PEDRO MALDONADO

¿POR QUÉ TENEMOS EL CEREBRO EN LA CABEZA?

PREGUNTAS Y RESPUESTAS SOBRE EL SISTEMA MÁS COMPLEJO DEL UNIVERSO

DEBATE

Índice

CUBIERTA
PRÓLOGO
INTRODUCCIÓN
¿POR QUÉ ES IMPORTANTE ESTUDIAR EL CEREBRO?
EL CEREBRO: SU ANATOMÍA, DIFERENCIAS Y POSIBILIDADES
LA RELACIÓN CEREBRO-MÁQUINA
EL CEREBRO Y LA EDUCACIÓN
LAS CAPACIDADES DEL CEREBRO
NEUROCIENCIA Y SALUD
AGRADECIMIENTOS
NOTAS
CRÉDITOS

PRÓLOGO

Cuando Pablo, mi hijo mayor, se acercaba a cumplir ocho años, sintió curiosidad por saber a qué me dedicaba y entonces me preguntó qué hacía todos los días. Le contesté que trataba de entender el cerebro humano. Esta respuesta, en apariencia, lo dejó tranquilo. Sin embargo, varios meses después volvimos a caer en el tema y repitió la pregunta, de modo que contesté de nuevo con la misma respuesta. Me miró extrañado y entonces preguntó: «¿Todavía estás haciendo eso?»

Luego de reírme con su pregunta, me di cuenta también de la dificultad para transmitir a mi familia y amigos lo complicado que es tratar de entender nuestro cerebro. Pertenezco a una generación de científicos que ha trabajado en este problema durante décadas, y los logros aún son insuficientes para acercarnos a una respuesta más o menos completa. Por siglos, la curiosidad sobre el cerebro ha concentrado el interés de mucha gente, y la actividad del neurocientífico se construye sobre esos avances. No es tarea menor, en este sentido, saber en cuántas generaciones más será posible satisfacer este interés. De momento es imposible saberlo. Incluso es difícil saber con exactitud cuánto conocemos sobre el cerebro humano. Las estimaciones que uno puede encontrar en los textos especializados llegan a un máximo del 15 por ciento y eso, considero, aún es un número optimista.

No es extraño, entonces, que el cerebro humano y todo lo que hacemos gracias a él despierte inevitable curiosidad. Las grandes preguntas del ser humano han estado centradas casi siempre en las cosas que podemos hacer, en nuestra habilidad de pensar, en las interacciones sociales, en nuestras emociones, en la creatividad y

en las preguntas que hacemos sobre la propia consciencia. Durante estos años de actividad científica he tenido la oportunidad de conversar acerca de este tema en lugares alejados del laboratorio —en salas de clase, seminarios y en charlas abiertas al público general—. En todas estas instancias surgen las mismas preguntas.

Este libro es, por tanto, el resultado de esas conversaciones, y busca reflejar la mayoría de las preguntas que una y otra vez aparecen en ellas. Compartir nociones duras y exactas con lectores no especializados conlleva el riesgo de perder rigurosidad y por esto pido comprensión a los lectores especializados que lean este libro. Por otro lado, es casi imposible hablar de un tema científico sin hacer referencia a algunos conceptos que pueden ser áridos, los cuales he intentado describir de la manera más general posible.

INTRODUCCIÓN

> «Mientras nuestro cerebro sea un misterio, el universo, el reflejo de la estructura del cerebro, también será un misterio».
>
> SANTIAGO RAMÓN Y CAJAL[1]

El cerebro humano es una de las estructuras más complejas que existe en el universo. Es un órgano que nos permite reír y llorar, ver y escuchar. Nos permite movernos, escribir poesía y pintar, diseñar naves espaciales para explorar tanto la Luna como las profundidades del océano. También nos permite establecer una relación social con otros seres humanos, comunicarnos y tener consciencia. Esta máquina biológica puede realizar una enorme gama de conductas diferentes, al mismo tiempo que nos hace las personas únicas que somos. ¿Por qué ocurre esto? ¿Qué propiedades tiene el cerebro humano para que sea tan especial?

En un individuo promedio, que pese 72 kilos, el cerebro humano pesa alrededor de un kilo y medio, lo que constituye aproximadamente el 2 por ciento del peso total de su cuerpo. Como todos los órganos del cuerpo, el cerebro está constituido por células. Las más importantes son las neuronas, que llegan a ser más de cien mil millones. En otras palabras, en cada una de nuestras cabezas existen más células que las estrellas que podemos observar en el firmamento.

Una de las características más importantes de las neuronas es su habilidad o capacidad de modificar, por medio de pulsos eléctricos y químicos, la actividad de otras neuronas o músculos, a través de conexiones que llamamos sinapsis, las cuales hacen del cerebro una enorme red de células que se conectan a través de seiscientos

billones de puntos de contacto. Estas conexiones superan con creces las que se encuentran en todas las computadoras y conexiones de internet que existen en el mundo. Muchas de estas conexiones se realizan a través de prolongaciones de las neuronas, llamadas axones y dendritas, que permiten conectar regiones cercanas y distantes del cerebro. Estas prolongaciones tienen un diámetro promedio de 0,002 milímetros (es decir, son cerca de cincuenta veces más delgadas que un pelo humano) y pueden conectar células vecinas o células a varios metros de distancia, como lo que ocurre entre la médula espinal de una ballena y los músculos de su cola. Si uno sumara la longitud de cada una de estas prolongaciones presentes en un cerebro humano, podríamos construir un cable biológico de más de trescientos cincuenta mil kilómetros de largo, lo suficiente para ir desde la Tierra hasta la Luna, o para dar veinticinco veces la vuelta a nuestro planeta.

A pesar del enorme avance científico en muchas áreas del conocimiento humano, no sabemos lo suficiente sobre el cerebro. Parece una ironía que, para entender una máquina biológica como esta, debamos usarla a ella misma para entenderla. Como afirma Lyall Watson, biólogo y zoólogo sudafricano: «Si el cerebro fuera tan simple que pudiéramos entenderlo, seriamos tan simples que no lo entenderíamos».

¿Qué es lo que sabemos del cerebro? Lo que hemos podido aprender es, en gran medida, gracias a la neurociencia. Esta disciplina tiene por objetivo entender sus procesos biológicos. Una de las características más importantes de esta área científica radica en su carácter multidisciplinario, pues converge con la biología, la psicología, la física, las ingenierías, la bioquímica, la medicina, la computación y muchas otras disciplinas largas de enumerar. En las últimas décadas, además, la neurociencia ha suscitado gran interés debido a la importancia que nuestra sociedad le ha atribuido para entender qué es lo que ocurre en nuestros cerebros. Francis Crick,

quien obtuvo el Premio Nobel en 1962 junto a James Watson por descubrir la estructura genética del ADN, las moléculas que constituyen nuestros genes y que son la base de la fabricación de todas nuestras proteínas, explicó en la revista *Scientific American* la importancia de la neurociencia: «No hay estudio científico más esencial para el hombre que el estudio de su propio cerebro. Nuestra entera visión del universo depende de eso».[2]

No tengo certeza de que finalmente el cerebro humano nos revelará todos sus secretos, o quizás, para entenderlo, necesitemos primero crear cerebros artificiales que nos ayuden. De lo que sí estoy seguro es que la neurociencia ha permitido conocer muchas cosas sobre nuestros cerebros, y parte de esos avances y descubrimientos se encuentran aquí, en este libro. Al mismo tiempo, nuestro desconocimiento de muchísimos fenómenos que dependen de nuestro cerebro es tierra fértil para el surgimiento de un sinnúmero de mitos, los cuales serán discutidos también. Comenzaremos, sin embargo, revisando los elementos fundamentales de la neurociencia.

¿POR QUÉ ES IMPORTANTE ESTUDIAR EL CEREBRO?

La relación entre el cerebro y nuestra conducta

La conducta humana ha provocado curiosidad desde la Antigüedad. Aristóteles proponía en su estudio *De las partes de los animales* que el asiento del alma y el control del movimiento voluntario —de hecho, de funciones nerviosas en general— debían buscarse en el corazón, puesto que el cerebro era, para el filósofo griego, un órgano de menor importancia.[3] El maestro de Alejandro Magno pensaba que el cerebro era una especie de radiador que servía para regular la temperatura del cuerpo y, en esta línea, afirmaba que aquellas personas que realizaban actos justos y temperados lo hacían porque tenían la «cabeza fría». Quizás en aquella época esta afirmación no era disparatada (para algunos, aún no lo es): es cierto que muchas veces cuando tenemos emociones fuertes sentimos una alteración importante de la actividad del corazón. No podemos culpar a Aristóteles por sus conocimientos sobre anatomía. Hipócrates —quien vivió más o menos en la misma época— propuso una idea que se encuentra vigente al día de hoy: afirmaba que «nuestros placeres, gozos, risas y juegos no proceden de otro lugar sino de ahí [del cerebro], y lo mismo las penas y amarguras, sinsabores y llantos».[4]

Ya desde la Antigüedad, vemos, se ha entendido que nuestro cerebro es el sistema biológico que organiza y ejecuta toda nuestra conducta: sin el cerebro no hay emociones ni percepción ni consciencia. Es tan importante, que la idea de estar o no estar vivo se relaciona directamente con la integridad de nuestro cerebro. Aunque diferentes países consideran distintos criterios para cuando una persona es declarada viva o muerta, la mayoría estima que la ausencia de actividad cerebral constituye un criterio legal para determinar la muerte. En estos casos, la persona declarada muerta

carece de actividad cerebral, lo cual se mide a través de la técnica de la electroencefalografía.

A su vez, como sociedad reconocemos que somos libres y conscientes de nuestras conductas y que, si nuestro cerebro no opera correctamente, ni siquiera podríamos ser legalmente responsables de lo que hacemos. Es por ello que una de las más maravillosas contribuciones del cerebro es su capacidad para generar nuevas conductas en un mundo en constante cambio, característica que, paradójicamente, está siendo creada gracias a las capacidades y posibilidades que nos ofrecen nuestros propios cerebros. Aún no sabemos los límites de lo que podemos hacer con este órgano, pero estoy convencido de que, en las próximas décadas, sabremos lo suficiente para tener una respuesta.

La importancia del estudio del cerebro y el resto del sistema nervioso

Existen, al menos, tres razones fundamentales para el explosivo interés científico y social en el cerebro humano. La primera razón tiene que ver con la visión de nosotros mismos como sujetos. La evidencia obtenida de estudios sobre nuestro cerebro y el de otros animales indica que este órgano se encuentra involucrado en la mayoría de las actividades básicas que realizamos —como ver, escuchar, tocar, correr, comer, dormir— y en otras que requieren mayor complejidad, como desarrollar emociones —reír, llorar, tener miedo—. Es también la fuente de conductas cognitivas como pensar o aprender, facultades que hacen posibles nuestras ideas filosóficas y políticas. Asimismo, nuestros sentimientos por nuestros hijos, padres o parejas surgen de la actividad eléctrica y química de nuestro cerebro. Sin este no podemos observar las múltiples conductas que determinan al ser humano, por lo que la mayoría de las cosas que reconocemos en nosotros provienen o requieren de la

integridad de este órgano en nuestras cabezas.

Entender los procesos cerebrales que dan origen a estas experiencias mentales implica acercarse a aquello que funda nuestro entendimiento, eso que nos define como humanos. Consideremos que una persona —el autor, por ejemplo— pudiera perder un brazo, o tener un trasplante de corazón o hígado. Todas las personas que me conocen seguirán reconociéndome como el ser humano que soy. Sin embargo, podría tener un accidente vascular o una lesión cerebral, que me podrían transformar en una persona completamente distinta, incapaz de reconocer a quienes me rodean. En casos extremos podría perder una parte importante de mi cerebro —por ejemplo, la corteza cerebral— y aunque siguiera respirando y mi corazón aun funcionara con normalidad, la sociedad consideraría que —como persona— habría muerto. Nuestra definición y caracterización de lo humano tiene mucho que ver, como podemos apreciar, con la capacidad y funcionamiento de nuestro cerebro.

Una segunda razón que hace importante estudiar el cerebro y el resto del sistema nervioso surge de la relación que existe entre el cerebro y las enfermedades neuropsiquiátricas. Quizás por su tremenda complejidad, el cerebro es también bastante frágil. Es el órgano menos resistente a la falta de oxígeno y, como está en cambio permanente, es susceptible de sufrir alteraciones importantes durante su desarrollo. En la adultez puede sufrir grandes cambios a consecuencia de una inflamación, por daños o lesiones producidas por golpes, por exposición a sustancias químicas o por mera falta de oxígeno. Debido a que la medicina ha podido avanzar en múltiples áreas del cuerpo humano, el cerebro y el resto del sistema nervioso se han quedado atrás por la dificultad que requiere la comprensión de muchos de los procesos que ocurren allí. Si no lo podemos entender, tampoco lo podemos curar. Esto ha tenido consecuencias directas en nuestra sociedad.

En años recientes ha ocurrido un importante aumento en el porcentaje de las enfermedades del cerebro, en parte, producto del aumento de personas de edad avanzada, debido a que muchas de las enfermedades importantes de la vejez están asociadas al cerebro.

Lo anterior ha implicado un aumento significativo del gasto social en salud neuropsiquiátrica. Por ejemplo, según cifras del European Brain Council (una organización sin fines de lucro que reúne asociaciones de pacientes, importantes sociedades relacionadas con el cerebro e industrias[5]), más de un tercio de la población sufre enfermedades asociadas al sistema nervioso, lo cual significa un desembolso de más de ochocientos millones de euros al año —casi 1.300 euros por habitante—. Esta cifra contrasta dramáticamente con la inversión que hace la Unión Europea en investigación biomédica, la cual alcanza solo un 0,01 por ciento del costo total de salud.

En Estados Unidos, el incremento en políticas de salud mental no es diferente. Cifras del Instituto Nacional de Salud (NIH)[6] indican que los costos de las enfermedades del sistema nervioso que aquejan a cincuenta millones de personas en ese país se acumulan hasta alcanzar la abultada cifra de mil quinientos millones de dólares al año, lo que equivale al 8,8 por ciento de su producto interno bruto. Entre las enfermedades más comunes del cerebro y el sistema nervioso que aquejan a los ciudadanos de Europa y Estados Unidos se hallan la pérdida de audición, los trastornos depresivos, la enfermedad de Alzheimer, los infartos y traumas cerebrales, la esquizofrenia y la enfermedad de Parkinson.

Nuestro país no está exento de esta epidemia y, de hecho, cifras del Ministerio de Salud de Chile muestran que más del 25 por ciento del número de años perdidos por discapacidad o muerte prematura están asociados a enfermedades del sistema nervioso. Entre las afecciones neuropsiquiátricas más comunes se encuentran

los traumas cerebrales, los trastornos de ansiedad, la adicción a drogas en niños y jóvenes, además de la enfermedad de Parkinson, demencia y enfermedad de Alzheimer en adultos y personas de la tercera edad. Estas enfermedades, además, están vinculadas a un cuarto de la pérdida de productividad en nuestro país.[7] Hay que considerar que una parte importante de estos costos son también sociales, puesto que una persona inhabilitada por su enfermedad requiere adicionalmente personas e infraestructura para su cuidado.

Es importante hacer notar que, de alguna manera, las enfermedades neuropsiquiátricas aparentemente no tienen el dramatismo social de muchas otras enfermedades, como el cáncer o las enfermedades cardiovasculares. Sin embargo, como revelan estas cifras, el impacto social por enfermedades del cerebro, tanto en nuestro país como en el resto del mundo, es enorme.

Una última razón por la cual el cerebro y los procesos mentales son de un gran interés para la sociedad tiene que ver con la relación que existe entre el cerebro y la educación —tema al que nos referiremos ampliamente más adelante—. No hay duda de que nuestro desarrollo cognitivo tiene su base tanto en este órgano como en el resto del sistema nervioso. El aprendizaje y la memoria son procesos mentales, por lo que entender estos procesos cerebrales nos permitiría ayudar a establecer mejores estrategias educacionales. Asimismo, durante las últimas décadas ha crecido el interés pedagógico sobre la neurociencia, promoviendo así un acercamiento importante entre estos dos mundos. Sin embargo, existen todavía desafíos pendientes. Estos contemplan en primer lugar entender con claridad qué es lo que ocurre en nuestro cerebro y diferenciar este conocimiento de muchos mitos que se encuentran enraizados en el pensamiento educativo, para luego entender cómo es que estas dos disciplinas —la pedagogía y la neurociencia— pueden reunirse para establecer una colaboración efectiva y útil en

las aulas. Más adelante en el libro mencionaré con más detalle cómo pueden trabajar en forma conjunta y eficiente, y cuáles son los desafíos para esta convergencia necesaria.

Las iniciativas neurocientíficas en el mundo

Una demostración de la importancia que ha adquirido la neurociencia en nuestra sociedad se manifiesta en los proyectos científicos más importantes iniciados en los últimos años, los cuales buscan las herramientas que nos permitirán en el futuro saber más sobre nuestro cerebro. En Estados Unidos, por ejemplo, el año 2013 la administración del presidente Barack Obama creó la iniciativa BRAIN (Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies), que busca aumentar el conocimiento sobre el cerebro a través de avances tecnológicos.[8] En este caso, la iniciativa quiere lograr algo parecido a lo que ocurrió bajo el gobierno del presidente John Kennedy en los años sesenta, quien impulsó la tecnología para mandar a un hombre a la Luna. Este megaproyecto busca generar avances de investigación con los cuales sea posible observar la totalidad de nuestro cerebro en tiempo real, para detectar y, de ser posible, atacar la mayor parte de las enfermedades que le afectan. Esta iniciativa fue diseñada a largo plazo, y se piensa que en los próximos cinco años se generarán herramientas tecnológicas para que, diez años después, puedan ser aplicadas.

Otra iniciativa igualmente importante es llevada a cabo por la Unión Europea, conocida como Proyecto Cerebro Humano, impulsada por la Comisión Europea del Futuro.[9] Esta iniciativa busca investigar el cerebro a distintas escalas y de una forma multidisciplinaria, pero a diferencia de la iniciativa norteamericana, uno de los pilares fundamentales de este proyecto

persigue modelar la totalidad del cerebro, utilizando nuevos y enormes computadores junto con los conocimientos obtenidos de diversos laboratorios de biología. Esta iniciativa involucra a un centenar de instituciones de diecinueve países europeos, y también involucra la inversión de más de mil millones de euros que, se espera, pueda concluir en una década.

Iniciativas semejantes se realizan en otros países. En Japón, por ejemplo, el proyecto Brain Mind es apoyado por el Ministerio de Educación, Cultura, Deporte, Ciencia y Tecnología y se enfoca en estudiar el cerebro de primates no-humanos bajo la premisa de que el cerebro de estos animales es esencial para comprender el nuestro y desarrollar, de ese modo, estrategias dirigidas a lograr el diagnóstico y tratamiento de trastornos psiquiátricos y neurológicos.[10]

EL CEREBRO: SU ANATOMÍA, DIFERENCIAS Y POSIBILIDADES

¿De qué está hecho el cerebro?

En la figura 1, se muestran fotografías de un cerebro humano visto desde varias perspectivas. Cuando se observa un cerebro, la impresión inicial que salta a la vista es una de sus características morfológicas más notables, que nos recuerda la apariencia de una coliflor. El cerebro, mirado desde afuera, sugiere esta estructura arrugada, una de las características más evidentes de su parte externa. Esta estructura es una lámina muy delgada, de aproximadamente 2,5 milímetros de espesor, pero tiene una superficie total de un metro al cuadrado. Como nuestra cabeza no es de ese tamaño, se reduce esta larga lámina y se forman estos pliegues. La mayor parte de nuestro cerebro consiste en esta lámina, la cual se denomina corteza cerebral.

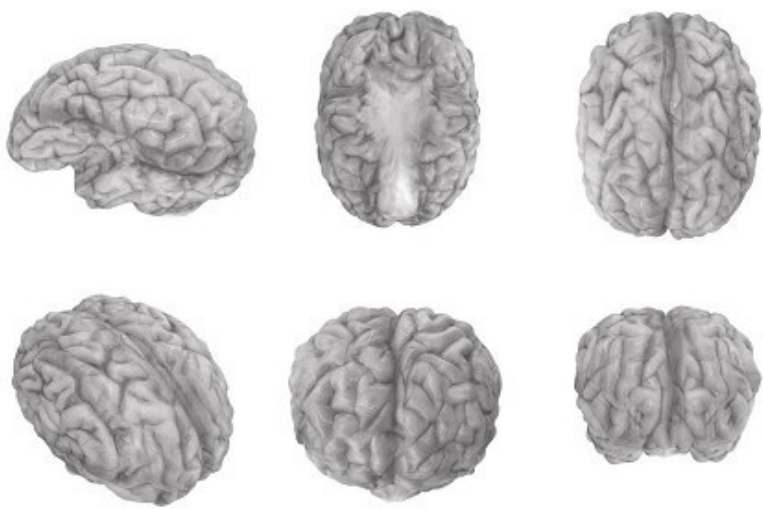


Figura 1. Imágenes de un cerebro. © *Shutterstock*

Ahora, si uno pudiese hacer un corte por la mitad del cerebro

(entre los ojos), lo que se observaría es algo como lo que aparece en la figura 2. Aquí se advierte que la mayor parte del cerebro está constituido por esta lámina plegada.

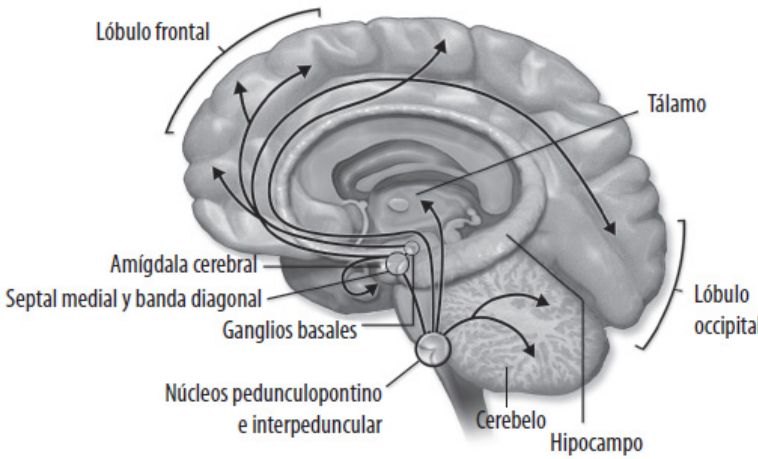


Figura 2. Imagen lateral de la mitad de un cerebro humano. © *Wikimedia commons*

Es posible apreciar, además, otra estructura que también tiene apariencia «arrepollada» y que es una parte del cerebro conocida como cerebelo, que está vinculada a nuestras conductas sensoriales y motoras.

Además de la corteza cerebral y del cerebelo, el cerebro está compuesto por ganglios basales, el tálamo y el tronco encefálico. No es mi intención detallar aquí aspectos neuroanatómicos, pero sí quiero enfatizar el hecho de que el cerebro está constituido por una serie de estructuras, compuestas por agrupaciones de neuronas que han ido apareciendo a través del proceso biológico de la evolución, es decir, que han sido añadidas a estructuras anteriores. Las capacidades del cerebro humano surgen —como podemos apreciar — del desarrollo de la corteza cerebral, una de las estructuras que

aumentó enormemente en primates y humanos, y que hoy ocupa una parte importante de nuestro cerebro.

Si hiciéramos otro corte, pero esta vez en otra dirección (de oreja a oreja), observaríamos lo que se muestra en la figura 3. En esta imagen se puede apreciar el tejido nervioso en dos tonos. Las partes del cerebro que se ven más oscuras corresponden a la «sustancia gris», nombre dado a las agrupaciones de los núcleos o cuerpos celulares de las neuronas, mientras que las áreas más claras corresponden a la «sustancia blanca», compuesta por las prolongaciones neuronales o axones. La relación entre ambas sustancias limita el crecimiento del cerebro, ya que cuantas más neuronas tiene, más conexiones necesita.

Por ejemplo, en una rata solo el 14 por ciento del cerebro está hecho de conexiones neuronales o materia blanca. En un perro, esta alcanza el 34 por ciento, mientras que, en los humanos, es el 60 por ciento. Esta tendencia sugiere que, si algún animal tuviese muchísimas más neuronas que las que tenemos los humanos, su cerebro consistiría prácticamente en conexiones o sustancia blanca. En la figura 3 también se aprecia la estructura plegada de la corteza cerebral, en donde es visible la gran cantidad de conexiones neuronales que posee el cerebro. Estas se establecen entre áreas de ambos lados del cerebro y entre el cerebro y la médula espinal. Algunas de estas prolongaciones que conectan la corteza con la última parte de la médula espinal pueden alcanzar una distancia de casi un metro de largo.

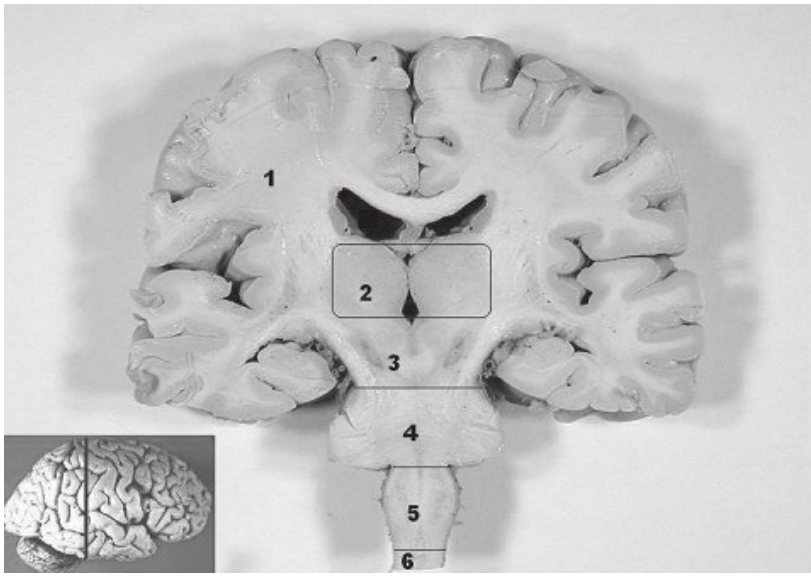


Figura 3. Corte en un plano frontal o coronal de un cerebro humano. © *Wikimedia commons*

¿Cuál es la diferencia entre mente y cerebro?

En la historia de la humanidad, la idea del cerebro como un ente físico y concreto (el órgano que se encuentra en nuestras cabezas) ha sido una idea consensual y robusta desde la Antigüedad, y se ha mantenido en vigencia hasta hoy. Nadie duda de que el cerebro es el órgano físico que tenemos dentro de nuestras cabezas, y sobre eso no existe debate alguno. Sobre lo que sí hay muchísimo debate es sobre el concepto de «mente».

La palabra mente proviene de *mens*, una raíz latina que significa «pensar». Es por ello que el concepto hace referencia a nuestra capacidad para elaborar pensamientos, pero también se ha extendido a nuestras experiencias perceptuales, a nuestras emociones y hasta a la consciencia. Estas experiencias no tienen una manifestación física como la que tiene el cerebro, y, por lo

tanto, se ha debatido si acaso tanto este como sus manifestaciones no-físicas, es decir, la mente, son producto de un mismo fenómeno o si, más bien, se debieran separar. Aristóteles y Platón consideraban la actividad mental como manifestación del alma. René Descartes, quien fue uno de los filósofos y matemáticos más importantes de la era moderna, introdujo el dualismo mente-cerebro, y llegó a afirmar que, ambos, si bien están relacionados, existen con independencia. Descartes fue influido por la existencia de máquinas que ejecutaban acciones en apariencia humanas, pero que eran el producto de una secuencia específica de engranajes mecánicos.

Este debate de la separación entre mente y cerebro no ha sido completamente zanjado. Más aún, aunque el concepto del alma no es ya parte de la discusión científica, al ser de alguna manera remplazada por el concepto de consciencia, aun cuando se mantiene activa la idea del dualismo cerebro-mente. El filósofo australiano David Chalmers argumenta que existe una brecha explicativa entre la experiencia objetiva y la subjetiva que no puede ser superada por el reduccionismo porque la consciencia sería, lógicamente, autónoma de las propiedades físicas de las cuales surge.

Lo que parece ser claro desde el punto de vista de la neurociencia es que, sin el cerebro, ninguno de los fenómenos que hemos descrito podría ocurrir. Sin cerebro, no hay mente. ¿Podrá eventualmente haber mente en un sistema complejo que no sea un cerebro, como un computador sofisticado u otra máquina parecida? Esto no lo sabemos aún. Por mi parte considero que la mente no es otra cosa que el cerebro en funcionamiento o, como afirmara Carl Sagan: «Mi premisa fundamental acerca del cerebro es que sus mecanismos —lo que llamamos a veces la ‘mente’— son una consecuencia de su anatomía y la fisiología, y nada más».

¿Es nuestro cerebro muy diferente del cerebro de otros animales?

El cerebro de los seres humanos y otros animales ha surgido —decíamos algunas páginas más atrás— por el curso biológico de la evolución, donde cada organismo es la consecuencia de la herencia genética de sus padres más una variación natural, que ocurre por el proceso de mezcla genética. Este proceso de evolución común significa que no solo el cerebro debiera ser parecido al de otros animales, especialmente los mamíferos con los que compartimos una historia evolutiva semejante, sino que también nos parecemos en casi todas las otras partes del cuerpo. Compartimos, por tanto, los mismos huesos y extremidades, así como similares órganos internos. Siguiendo la lógica evolutiva, no es sorprendente entonces que también compartamos un sistema nervioso similar, incluido el cerebro. En términos generales, los cuerpos se asemejan cuando la divergencia de tiempo entre distintas especies haya sido menor, y los cerebros de distintos animales son distintos en la medida que se encuentren más separados evolutivamente.

Llegados a este punto, cabe preguntarse: ¿cuáles son las diferencias principales de nuestro cerebro con el de otros animales? Si observamos las estructuras básicas del cerebro humano, nos encontraremos con que el resto de los animales tienen las mismas estructuras que nuestro cerebro, incluyendo los distintos componentes de los que hemos hablado, como la corteza cerebral. Sin embargo, es en esta última estructura donde podemos encontrar la mayor cantidad de diferencias, pues la distinción entre los cerebros de los animales se da justamente por la cantidad de corteza cerebral en relación con el cuerpo de cada uno. Esta comparación es relevante, pues mientras más grande es el cuerpo de un animal, más trabajo requiere el cerebro para mantenerlo. Nuestro cerebro es más grande que el cerebro de un gato o un perro, pero esto es porque tenemos también un cuerpo más grande

y, asimismo, animales más grandes que nosotros tendrán cerebros más grandes. Si examinamos esta relación, encontramos una proporción directa entre estas dos variables. Esto es comprensible porque el cuerpo requiere una mayor cantidad de trabajo para poder contribuir a la mantención adecuada de las diferentes funciones que requiere la fisiología de un cuerpo de mayor tamaño. Al mismo tiempo, esta relación entre los tamaños del cuerpo y cerebro no es siempre igual y existen animales que se desvían ligeramente de esta relación presentando un cerebro más grande de lo que se espera para el tamaño de su cuerpo. Entre estos animales se encuentran los delfines y los ratones, y ciertamente, el ser humano, que posee un cerebro cuyo tamaño es mucho más grande de lo esperado para su cuerpo. De hecho, otros primates como los gorilas, que son ligeramente más grandes que nosotros, tienen un cerebro sustancialmente más pequeño que el nuestro.

Ahora bien, es importante destacar que el aumento proporcional de nuestro cerebro tiene que ver principalmente con la corteza cerebral. Un elefante tiene un cerebro cuyo tamaño es un poco más del doble de tamaño del cerebro de un humano promedio, pero en este animal el peso del cerebro es apenas un 0,08 por ciento de su peso total, comparado con un humano promedio, donde este órgano constituye un 2 por ciento de su peso total. Además, en el elefante, más del 97 por ciento de sus neuronas se encuentran en el cerebelo y no en la corteza. Esto lo podemos asumir por las especializaciones sensoriales y motoras de este animal. Por el contrario, el cerebro humano, que mide la mitad del tamaño del cerebro de un elefante, tiene tres veces más neuronas en la corteza cerebral. Esta estructura, que relacionamos en forma directa con nuestras habilidades cognitivas, parece haber crecido hace más de un millón de años para darle a nuestro cerebro su forma actual, y no es sino su enorme volumen lo que nos diferencia de otros animales.

En la figura 4 podemos ver un dibujo realizado por el gran científico español Santiago Ramón y Cajal, considerado el padre de la neurociencia moderna. Ramón y Cajal, quien obtuvo el Premio Nobel en 1906, revolucionó esta disciplina científica con sus ideas sobre el funcionamiento del cerebro en sus detallados dibujos.

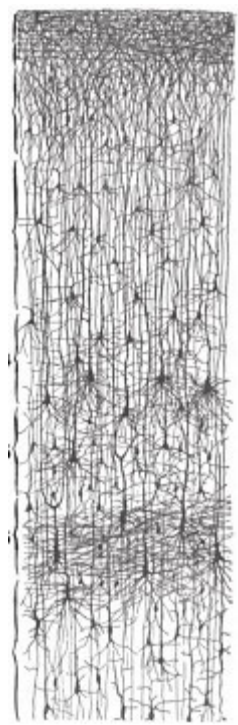


Figura 4. Dibujo de un trozo de corteza cerebral, hecho por Santiago Ramón y Cajal en 1899. El tejido aquí dibujado tiene un tamaño real de 2,4 milímetros de alto por 0,8 milímetros de ancho.

La figura ilustra el corte de una pequeña porción de la corteza cerebral occipital, que está involucrada en la percepción visual. Se pueden apreciar tanto los cuerpos o núcleos celulares de las

neuronas (pequeños triángulos oscuros) como sus conexiones. Un aspecto relevante que se advierte al examinar esta figura, al mirar con detalle la estructura del sistema nervioso, es el modo en que está hecho y está conectado el cerebro. Sin embargo, eso no es suficiente para entender su funcionamiento. Muchas veces saber cómo están formados los distintos sistemas biológicos nos permite entender su funcionalidad. Consideremos el corazón como ejemplo. Si no supiéramos qué es lo que hace, probablemente examinaríamos su estructura y luego veríamos que está compuesto de cámaras y válvulas, características que sugieren su rol como una máquina para impulsar líquidos, en este caso, la sangre. A su vez, podemos mirar la estructura del riñón y deducir que se trata de un proceso para filtrar la sangre, o podríamos mirar los músculos y huesos y entender su funcionalidad mecánica. Pero ¿qué ocurre con el cerebro? Si bien la estructura neuronal nos ha ayudado a entender la contribución de cada parte del cerebro en la conducta, no nos revela los secretos de cómo se generan los diferentes comportamientos.

Lo que se observa en la figura 4 es un enorme y complejo entramado de neuronas y conexiones, provenientes de una sección de una corteza cerebral (corteza visual), pero ayuda poco a entender cómo es que lo que allí ocurre termina en nuestra experiencia visual.

Como es posible apreciar, uno de los grandes misterios de nuestro cerebro es que, donde quiera que miremos, vemos esta estructura de entramados y conexiones que tiende a ser bastante parecida en todo su largo y ancho. Es decir, la corteza que tenemos en la parte trasera de la cabeza se parece mucho al cerebro que tenemos al frente, arriba o a los lados, aunque sabemos que cada una de estas regiones participa en procesos mentales distintos. Cuando se lesiona la corteza occipital, una persona puede quedar ciega, y si se lesiona parte de la corteza lateral puede quedar sorda.

Sin embargo, la estructura básica de estas cortezas es prácticamente idéntica. Más adelante veremos que incluso las dos pueden funcionar para ver y para escuchar. Notablemente, la estructura básica de la corteza cerebral es muy parecida entre distintos animales, de manera que la estructura mostrada anteriormente podría ser, en principio, de un mono o un humano, pero también podría ser de un perro o una rata. Esto sugiere fuertemente que los procesos básicos, tal como ocurren en esta, son similares tanto dentro de un mismo cerebro como en los cerebros de distintos animales. Además, sugiere que tal estructura puede ser un tejido multipropósito y plástico, el cual ayuda a enriquecer la conducta dependiendo del contexto y del aprendizaje. Esto explicaría por qué, por ejemplo, los animales que tienen más corteza cerebral muestran un mayor aprendizaje y flexibilidad en sus conductas.

Ningún cerebro es similar al otro

Como sabemos, las personas —pero también los animales, bacterias y plantas— son la consecuencia de un proceso de desarrollo genético. Esto, porque los mecanismos de reproducción implican una variabilidad biológica. Esta última característica es, quizá, uno de los aspectos fundamentales de la biología, y el más ignorado: la «diversidad». No existen, por tanto, dos organismos idénticos. Cada organismo es particularmente único debido a que es el resultado no solo de la variabilidad genética, sino además de la expresión de esos genes, proceso que depende, sobre todo, de la interacción de los organismos con el medio ambiente.

Quizás podríamos hacer un paralelo entre los cerebros y las ciudades. En distintas ciudades encontramos un centro y los suburbios. Existe en cada ciudad una plaza de armas, una iglesia

principal, mercados y parques. También encontramos avenidas principales y avenidas secundarias. Aunque todas las ciudades tienen los mismos componentes, cada una de estas estructuras varía de ciudad en ciudad, aun cuando hubiesen sido construidas usando los mismos planos. Además, cada una de estas calles y avenidas puede ir variando de aspecto en el tiempo. Pues bien, los cerebros de distintas personas tienen partes gruesas muy parecidas, como la corteza cerebral, el cerebelo o el tronco encefálico, pero los detalles de las neuronas que forman parte de estas estructuras y sus conexiones pueden ser muy diferentes entre un organismo y otro. Mientras más gruesas son las características que comparemos, más similitudes encontraremos, y mientras más detalle examinemos, más diferencias se notarán. Tal y como ocurre con las calles de una ciudad, que pueden nacer, cambiar o morir, las neuronas de nuestro cerebro pasan por los mismos procesos.

Es cierto que los cerebros de distintas personas pueden ser diferentes, y si bien compartimos con todo el resto de los seres humanos una estructura general con un grado de complejidad semejante, ningún cerebro es similar a otro. Esto ocurre, en parte, porque, producto de la variabilidad, nacemos con cerebros diferentes, y en parte, porque nuestro cerebro va cambiando durante la vida. Ni siquiera nuestro propio cerebro se mantiene igual por mucho tiempo. En los minutos que usted lleva leyendo este libro, su cerebro ha perdido decenas de miles de neuronas. Aunque esto parece alarmante, la muerte de neuronas y los cambios sinápticos son procesos naturales y no deterioran su capacidad mental. Buena parte de lo que aprendemos y recordamos tiene que ver, más bien, con el mantenimiento y realización de nuevas conexiones entre neuronas.

Aunque como seres humanos compartimos suficiente similitud tanto corporal como cerebral —lo cual nos permite tener conductas comunes y reconocernos como grupo biológico—, en la medida que

nuestros cerebros son originales e irrepetibles, en cada momento somos seres humanos únicos e irremplazables. Incluso ocurre en el caso de gemelos, los cuales, aunque son parecidos, no son idénticos en todos los aspectos. Si bien comparten los mismos genes, cuándo y cuáles de estos genes se expresan, depende de manera importante de lo que ocurre en sus vidas. Al final, hasta los gemelos presentan diferencias en sus cerebros.

Pero ¿por qué tenemos un cerebro tan complejo?

Como sucede muchísimas veces en la ciencia y en otras disciplinas, existen distintas interpretaciones en torno a un concepto, lo cual dificulta su estudio y discusión. La idea de «complejidad» es uno de estos casos. Me referiré entonces a esta como la propiedad de un sistema —en este caso el cerebro— capaz de exhibir propiedades y comportamientos que no son evidentes o no pueden deducirse a partir de la suma de sus componentes. Por tanto, el conjunto del cerebro y sus interacciones generan fenómenos (conductas) que no pueden ser descritas mirando solamente cada uno de los componentes que lo integran (neuronas). También se puede entender la complejidad como el esfuerzo que debe hacerse para describir por completo toda la estructura y función de un sistema. Bajo esta mirada, no conocemos un sistema más complejo en el universo que el cerebro humano. ¿Cómo llegó a surgir dentro de nuestras cabezas el objeto más complejo que conocemos? Quizás esto parece algo muy improbable dentro de la biología, pero cuando se examinan en detalle algunas de las propiedades de la evolución en los seres vivos, la aparición de sistemas complejos resulta inevitable.

Examinemos el proceso a través del cual aparecen, desaparecen y varían las diferentes especies animales. Consideremos la siguiente

situación: supongamos que un animal con cierto grado de complejidad se reproduce. Debido a la variabilidad inherente del proceso de reproducción biológica, la descendencia puede ser igual, menos o más compleja. La teoría de la evolución propuesta por Charles Darwin sostiene que lo único que se requiere para que estos descendientes se mantengan a través del tiempo es que su adaptación sea adecuada al medio para que sea capaz de reproducirse. Si durante el proceso evolutivo un organismo tiene una descendencia más compleja y este último permanece adaptado a su medio, entonces continuará viviendo. Si estos nuevos organismos se reproducen, existirá entonces entre el conjunto de animales uno más complejo. Como consecuencia de este proceso, transcurrido suficiente tiempo se observará el surgimiento de sistemas biológicos cada vez más complejos. Es importante hacer notar que esto no implica ni requiere de ninguna direccionalidad del proceso evolutivo hacia la complejidad de nuevos organismos.

Algo que advertimos al estudiar el proceso evolutivo es que la probabilidad de que sistemas más complejos aparezcan es muchísimo más baja (aunque no nula) que la probabilidad de que aparezcan organismos de igual complejidad. Esto es exactamente lo que se observa cuando se examina la diversidad biológica de los seres vivos, es decir, que la gran mayoría de los organismos vivientes sigue teniendo en la actualidad una complejidad mucho más sencilla que la de un ser humano. De hecho, la gran mayoría de las especies que existen en el planeta consiste en bacterias, plantas e insectos, organismos que son sistemas biológicos de baja complejidad comparados con los mamíferos, que son los animales que más vemos y conocemos. Incluso si uno considera a los seres humanos en términos de masa biológica, por cada individuo en el planeta hay más de trescientas toneladas de bacterias y otros organismos unicelulares de baja complejidad. Si reuniéramos todas las especies de mamíferos, como vacas, ratones, perros, gatos,

leones o ballenas, contaremos casi 6 mil especies diferentes, pero este número resulta ser ínfimo comparado con el número de especies de insectos, grupo animal que puede estar compuesta por más de 250 mil especies diferentes. Los más de 7 mil millones de seres humanos que vivimos en el planeta somos, en conjunto, menos del 0,0001 por ciento del material viviente en la Tierra.

En otras palabras, somos el asombroso e infrecuente producto de un proceso biológico de creciente, pero inevitable, complejidad.

¿Por qué tenemos el cerebro en la cabeza?

«¿Por qué el cerebro está alojado en un lugar tan frágil?», es una pregunta que he escuchado en más de una oportunidad. «Quizás, si estuviera en la mitad del pecho, como el corazón, el cerebro estaría más protegido», dicen algunos después. La respuesta a esta pregunta se encuentra vinculada con el proceso evolutivo. Si se examinan los distintos tipos de sistemas nerviosos que poseen hoy los animales, nos podemos formar una buena idea tanto de la progresión evolutiva como del desarrollo del sistema nervioso y del cerebro. Los primeros animales en los que podemos observar un sistema nervioso son las medusas, las cuales se caracterizan por tener una red de células nerviosas difusa, así como una simetría radial, es decir, que son circulares.

Esto último es relevante porque una característica importante en la evolución es la aparición de animales que tienen simetría bilateral, es decir, que tienen un lado izquierdo y derecho. Cuando los animales poseen esta simetría también tienen una parte superior e inferior, y lo que es más importante, una parte frontal y una posterior. En la medida que los animales empezaron a desplazarse, lo hicieron generalmente siguiendo una dirección preferente de movimiento. Como estos también tenían un tubo

digestivo, se movían hacia delante con el extremo donde estaba la boca, para capturar la comida. Esto también significa que, para mantenerse vivos y reproducirse, era importante que detectaran los cambios que ocurrían en el medio ambiente, en particular donde el organismo pudiera sentir y procesar primero, es decir, lo que se encontrara frente a ellos. Por esta razón es que también en la cabeza tenemos muchos de nuestros sistemas sensoriales: los ojos, la nariz, la lengua y el oído.

Este proceso biológico es conocido como «cefalización», es decir, un aumento de la complejidad del sistema nervioso en la parte más cercana del frente de avance de los animales. Un contraejemplo importante de esta idea proviene de la existencia de animales en los cuales no se observa una dirección preferente de movimiento. Si existen animales que no tienen una dirección preferente de movimiento, debiéramos encontrar que su sistema nervioso no ha pasado necesariamente por este proceso de cefalización y que sus neuronas están distribuidas. Esto es justamente lo que ocurre con las anémonas y otros animales parecidos a las medusas, y sucede también en el grupo de animales equinodermos, como son los erizos y las estrellas de mar. Estos animales no tienen una dirección preferente de movimiento y su sistema nervioso no tiene un cerebro, sino que las distintas partes del sistema nervioso se encuentran repartidas en un anillo circular. A diferencia de otros animales, en algún momento hace millones de años los humanos dejamos de movernos en cuatro patas y, por ello, dejamos de movernos con la cabeza hacia delante, para erguirnos y movernos con la cabeza sobre nuestro cuerpo. Las razones de este cambio son todavía asunto de gran debate científico en la antropología. Que el cerebro —y otras características del sistema nervioso— se encuentre en nuestra cabeza habla de que la diversidad biológica tiene limitaciones importantes con respecto a qué forma pueden tener los diferentes organismos, y es que no cualquier forma de

vida es posible físicamente. Cuando descubramos vida en otros planetas quizás descubramos también que estos organismos están sujetos a las mismas restricciones de desarrollo y evolución que nosotros.

25 Watts

Si tener un cerebro más amplio y, en consecuencia, poseer más corteza cerebral nos permite ampliar nuestro ámbito de conductas y ser más inteligentes: ¿Por qué la naturaleza no ha posibilitado la existencia de cerebros mucho más grandes de los que tenemos? Una de las limitaciones fundamentales tiene que ver con el gasto energético. El cerebro humano utiliza aproximadamente un cuarto de toda la energía que produce el cuerpo, por lo que buena parte de nuestro metabolismo debe generar la energía necesaria para suplir al cerebro y sus operaciones mentales. Aunque las estimaciones varían, se calcula que el cuerpo humano utiliza diariamente la misma energía que una ampolleta de 120 Watts, de la cual el cerebro consume entre el 20 y el 25 por ciento, es decir, cerca de 25 Watts. Nuestro tejido nervioso está hambriento de energía, ya que consume diecisiete veces más energía que cualquier otro tejido u órgano.

Para adquirir la energía, los humanos, como todos los animales, consumimos una dieta que en nuestro caso es, en general, de 2.400 calorías diarias. Esta cantidad puede parecer bastante menor, pero para los mecanismos biológicos obtener esta cantidad de calorías requiere un gran esfuerzo. Cada día, las calorías que consumimos mediante la alimentación tienen que ser transformadas en moléculas que contienen energía química, de modo que nuestro metabolismo genera y consume una enorme cantidad de estas moléculas, las cuales, de ser reunidas, equivaldrían al peso de

nuestro propio cuerpo. El cerebro utiliza, como vemos, buena parte de esta energía. Un tercio de esta energía en el cerebro se ocupa en los procesos biológico-moleculares básicos necesarios para mantener vivas a las neuronas. Otra parte de la energía se ocupa en generar los pulsos eléctricos (llamados «potenciales de acción»), que se trasmiten a través de las prolongaciones neuronales. El resto de esta energía se ocupa en mantener la maquinaria celular y química necesaria para comunicar las neuronas con cientos de otras neuronas a través de las sinapsis. Este consumo y gasto energético tiene consecuencias importantes para el funcionamiento del cerebro. Cuando puede, el cerebro disminuye su actividad para ahorrar energía. Esto ocurre, por ejemplo, cuando dormimos, o cuando nuestro cerebro no está prestando atención a lo que nos rodea. Es por ello que varios centros de control ubicados en el tronco cerebral bajan o suben la intensidad de la actividad cerebral según los requerimientos del entorno.

Es importante destacar que estas limitaciones energéticas pueden ser la razón subyacente del desarrollo espacial del cerebro humano. Como dije antes, no es el tamaño de nuestro cerebro lo que más importa, sino el hecho de que tenemos más neuronas en la corteza cerebral, lo que hace que necesitemos más energía que otros animales. Si solo nos alimentáramos, por ejemplo, de apio, tendríamos que estar masticando quince kilos de esta planta al día, y eso que gran parte de esas calorías se gastarían solo en masticar y digerir la planta. Se piensa que hace unos quince millones de años, nuestros antepasados dominaron el fuego e inventaron un modo eficiente para obtener calorías: me refiero al acto de cocinar.[11] Con esta innovación, los humanos pudieron ingerir de forma eficiente comida predigerida y obtener así una gran cantidad de calorías consumiendo una menor cantidad de alimento y en poco tiempo, liberando a nuestro cerebro de tener que buscar comida para su subsistencia y poder así usarlo en actividades más complejas, las

cuales eventualmente lo habrían llevado a su desarrollo actual.

La corteza cerebral trabaja en grupos

Una de las obsesiones que tenemos quienes nos dedicamos a la biología es la de clasificar cada aspecto de los seres vivos, y el cerebro humano no es la excepción. Para entender este sistema complejo, una de las primeras cosas que hemos intentado hacer es caracterizar los distintos componentes del cerebro en partes únicas. He mencionado anteriormente que nuestro cerebro se compone en su mayoría de corteza cerebral, pero también posee una cantidad significativa de estructuras adicionales, como el cerebelo y una serie de núcleos internos que se asocian a distintos tipos de funciones. Esta obsesión de los biólogos de dividir el cerebro en distintos componentes va acompañada de la idea de que cada una de estas estructuras tiene un rol o función específica. Históricamente hemos asignado un rol especial a cada parte del cerebro, tal y como hemos hecho con el resto de las funciones del sistema nervioso. Sin embargo, en el caso de la corteza cerebral esto ha sido particularmente difícil dada la similitud que existe entre los circuitos neuronales en distintas partes de esta.

Es sabido que en la corteza cerebral las distintas regiones participan de manera diferente para generar nuestra conducta. Esta participación se establece de forma temprana durante el desarrollo del cerebro en la infancia, con independencia de la experiencia. Por ejemplo, una parte de la corteza cerebral ubicada en el costado frontal izquierdo del cerebro está asociada al habla. Esta área cortical se conoce como el «área de Broca», descubierta por el anatomista y antropólogo francés Pierre Paul Broca, quien observó que lesiones en la parte izquierda de la corteza cerebral impedían una apropiada conducta del habla en algunos de sus pacientes. La

asignación de áreas corticales a distintas funciones fue completada a principios del siglo XX por un anatomista alemán, Korbinian Brodmann, quien caracterizó más de cincuenta áreas corticales diferentes, basado en las características anatómicas finas de las distintas porciones de la corteza cerebral, y estableció un mapa funcional de esta que nos acompaña hasta hoy.

Al mismo tiempo, es de común acuerdo en la actualidad que la asignación de una participación de una estructura a una determinada función basada en la morfología de la corteza y en el estudio de lesiones no significa que esa función se encuentre localizada o sea responsabilidad exclusiva de esa porción del cerebro. De hecho, Brodmann estaba influido por los descubrimientos de Broca, así como por la práctica de una popular pseudociencia llamada frenología, desarrollada a principios del siglo XIX por el neuro-anatomista alemán Franz Joseph Gall, la cual concebía a la corteza como una colección de módulos corticales independientes, donde cada uno se encontraba asociado a una función mental específica. La asignación de funciones llegó a un extremo tal que incluso cada uno de los distintos rasgos de personalidad se debía a la acción de un módulo particular del cerebro y, por tanto, el cráneo adoptaba una forma particular dependiendo de cuanto crecía cada módulo. Gall pensaba que había descubierto un método para determinar la personalidad y el desarrollo de las facultades mentales y morales sobre la base de la forma externa del cráneo. Durante su vida, el científico alemán recolectó y observó más de ciento veinte calaveras para probar sus hipótesis. De hecho, recorrió también muchos lugares y pueblos donde realizaba exploraciones, que consistían en poner las manos sobre el cráneo de los habitantes y, según la cantidad de protuberancias que tuviesen cada una de las personas, asignarles distintas habilidades cognitivas y rasgos de personalidad.

Si bien la frenología fue desacreditada, aún permanece algo de

ella en nuestra manera de observar y asignar a cada parte del cerebro una función específica. Sobre todo porque lesiones producidas en alguna de estas áreas corticales producen un déficit específico en una conducta o habilidad determinada. Sin embargo, es importante considerar que remover o lesionar un área solo demuestra que ese componente es necesario para que la conducta o habilidad mental se pueda dar. Quizás otras partes del cerebro son igual de importantes para poder tener esa función. La neurociencia moderna considera, y ha mostrado, que la mayor parte de las funciones cerebrales requiere la participación de muchas estructuras del cerebro simultáneamente y no puede asignarse a una sola parte del cerebro el rol exclusivo de una conducta. Es por ello que hemos cambiado nuestra mirada de la función cerebral, desde una participación individual a una operación colectiva de muchas áreas cerebrales.

Uno de los ejemplos más robustos de esta idea proviene de estudios que permiten visualizar la actividad cerebral simultánea de todas las neuronas del cerebro de manera indirecta, a través de técnicas como el TEP (tomografía de emisión de positrones), que han permitido verificar que varias de nuestras conductas requieren la participación simultánea de varias partes del cerebro. El TEP utiliza una técnica médica dónde se inyecta en el torrente sanguíneo un trazador que puede ser detectado por una máquina. Cuando determinados grupos de neuronas tienen mucha actividad, deben capturar más azúcar, entre ellas, estas moléculas radioactivas, por lo que terminan acumulándose en lugares de alta actividad neuronal. Esta técnica permite establecer qué regiones del cerebro están activas cuando una persona realiza cierta actividad, y en el ámbito médico tiene el propósito de detectar qué regiones del cerebro podrían estar funcionando con un metabolismo alterado producto de alguna enfermedad o lesión. Por otro lado, cuando se usa esta técnica para examinar lo que pasa en

conductas normales, uno puede observar qué partes del cerebro participan de diferentes conductas.

Examinemos una imagen tomada con TEP[12] del cerebro de una persona. Veremos lo que se muestra en la siguiente figura. Cada imagen representa un nivel o sección del cerebro donde, en cada caso, el frente de la cabeza está hacia arriba y la parte posterior hacia abajo. Si le pedimos a esta persona que mire una fotografía, es posible constatar una importante actividad metabólica en la parte posterior del cerebro, pero, al mismo tiempo, vamos a ver decenas de otras partes de la corteza cerebral que también se encuentran activas, representadas en la figura por áreas más claras, y por las flechas blancas que indican el lugar de máxima actividad metabólica. Las áreas negras al centro de cada imagen corresponden a los ventrículos o cavidades del cerebro, que están llenas de líquido. Si luego se le pide al sujeto que, en vez de mirar, escuche música, observaremos que la parte occipital (parte inferior) tiene menos metabolismo y, en cambio, sectores de la corteza de los costados del cerebro tendrán mayor actividad. Sin embargo, como ocurre en el primer caso, otras estructuras de la corteza muestran también bastante actividad, incluso áreas que se encontraban activas durante la primera tarea. Algo parecido ocurre con cualquier conducta, como hablar, pensar o recordar. Incluso, al pedirle a sujeto que descanse, el cerebro todavía muestra una gran actividad en varios lugares del cerebro, como se puede apreciar en las imágenes superiores de la figura.

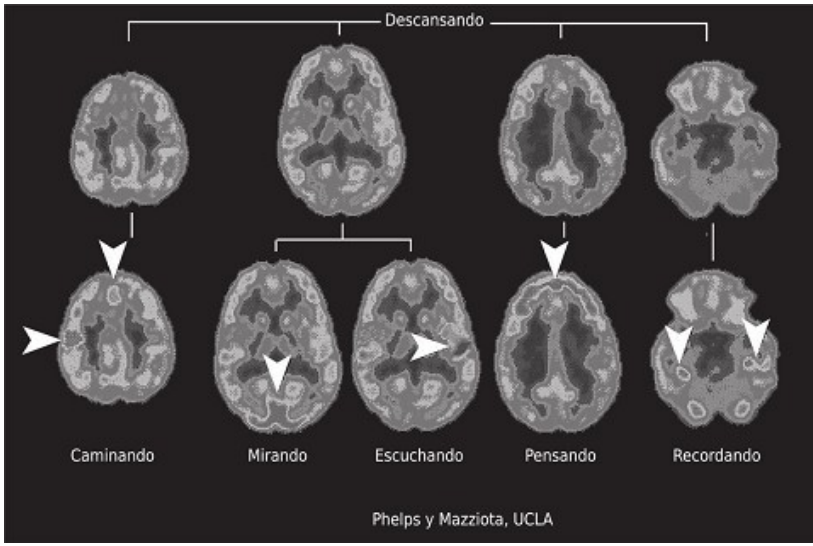


Figura 5. Imagen de una TEP. © *Cortesía de Michael Phelps*

Podemos afirmar, por tanto, que las diferentes áreas de cerebro no cumplen una única función, y que, más bien, trabajan de manera colaborativa en cada una de nuestras conductas. Incluso cuando se le pide a una persona que no haga nada, una parte significativa de la corteza cerebral muestra actividad. Todo lo que hacemos es, como vemos, el resultado de la contribución de varias áreas del cerebro, las cuales trabajan de forma incansable y cooperativa para llevar a cabo nuestras conductas y estados mentales.

Usamos el 100 por ciento de nuestros cerebros

Una de las convicciones más generalizadas sobre el cerebro humano es la creencia de que ocupamos solo una fracción de la capacidad cerebral. El origen de esta afirmación se remonta a la segunda mitad del siglo xix y se atribuye, en gran parte, a lo escrito

por el psicólogo americano William James quien afirmaba que hacemos un uso menor de nuestros recursos físicos y mentales.

Según se afirma, a un periodista que escribió una nota sobre el investigador se le ocurrió mencionar que la capacidad usada por el cerebro era de un 10 por ciento. Por otro lado, a principios del siglo xx, las primeras técnicas de registro eléctrico del cerebro mostraban grandes áreas con baja actividad, las que de hecho fueron denominadas «áreas lentas», lo que también podría haber contribuido a esta idea de un bajo porcentaje de uso de nuestro cerebro. Sin embargo, técnicas modernas como el mencionado TEP han permitido directamente medir la actividad metabólica del cerebro y muestran que, frente a diferentes conductas, muchas de las cuales son bastante simples, se requiere de la activación simultánea de partes distintas del cerebro y que, por ello, ocupamos prácticamente todo el cerebro para su ejecución.

No existen áreas del cerebro que exhiban una baja actividad en forma permanente. De hecho, hay un segundo argumento importante que derriba esta creencia y que se relaciona con el fenómeno de la «plasticidad neuronal», del cual hablaremos en detalle más adelante. Este fenómeno implica que el cerebro cambia su estructura permanentemente debido a que las conexiones entre las neuronas dependen en gran medida de la intensidad de su actividad. Si la actividad neuronal en alguna parte del cerebro se detiene, esta región se atrofia, disminuyendo notablemente su capacidad para participar en diversas conductas. Para la neurociencia es claro, por tanto, que la mayoría de las conductas diarias que ejecutamos requieren ocupar el cerebro en su totalidad, es decir, ¡en un cien por ciento!

Asimismo, no debemos olvidar que, aunque usemos la totalidad de nuestra capacidad cerebral, cada uno de nosotros tiene un cerebro diferente. Nuestras capacidades mentales difieren en la medida en que nuestro cerebro ha reforzado las conexiones en

aquellas áreas cerebrales que están relacionadas con conductas que realizamos con mayor frecuencia.

LA RELACIÓN CEREBRO-MÁQUINA

¿Funciona el cerebro igual que un computador?

Con frecuencia se hacen comparaciones entre el cerebro humano y un computador, y es que algunos piensan que la manera en que funcionan se asemeja. De hecho, es habitual referirse al cerebro en términos de computación. Expresiones como «se me borró el disco duro» o «no he procesado esos datos» sugieren que el cerebro humano y un computador tienen formas parecidas de funcionamiento. Sin embargo, existen diferencias importantes en la manera en que ambos operan.

En los computadores existe una unidad central de procesamiento (CPU) que realiza una sola operación a la vez, la cual puede ser aritmética o lógica, con valores que obtiene desde el dispositivo de memoria o desde el almacenamiento. Luego vuelve a realizar otra operación siguiendo una larga secuencia determinada por el programador. Una CPU, por tanto, solo es capaz de llevar a cabo operaciones siempre en forma secuencial. Esto parece ser algo ineficiente, sin embargo, lo relevante es que hace esta operación de forma rápida, al punto de que una CPU puede hacer más de mil millones de estas operaciones en tan solo un segundo. En cambio, en el cerebro, cada una de los miles de millones de neuronas monitorea en forma continua las conexiones que recibe de otras neuronas y, según el nivel de actividad de esas conexiones, generará un pulso eléctrico que llegará a miles de otras neuronas.

Expuesta la diferencia principal, cabe preguntarse por lo que resulta común a ambos. Una similitud posible es que funcionan con corriente y señales eléctricas, pero en el caso del primero, la actividad eléctrica fundamental ocurre en todas las células, mientras que, en el segundo, en un solo sitio.

Podemos decir, por tanto, que en un computador el

procesamiento es *en serie*, mientras que en el cerebro el procesamiento ocurre *en paralelo*. Además, en el cerebro estos fenómenos ocurren de manera más lenta, en comparación con el computador, debido a las limitaciones de nuestros sistemas biológicos. Los computadores nos ganarán siempre en velocidad, pero nuestro cerebro es de una capacidad paralela tan enorme que de ningún modo se acercan a la riqueza de su procesamiento.

Quizás el lector conoce la historia del computador Big Blue, famoso por ganar una partida de ajedrez al campeón mundial Garry Kaspárov por primera vez en 1966 y luego en una revancha, ocurrida en 1997. También podrá recordar que recientemente, en 2017, otro computador le ganó en el juego de tablero GO al chino Je Kie, quien en ese momento era el mejor jugador del mundo. La habilidad de ganar en estos juegos complejos sugiere una enorme capacidad de procesamiento y los computadores utilizados, en efecto, eran máquinas enormes. Sin embargo, es importante hacer notar al mismo tiempo que esta habilidad es la única que podían llevar a cabo estos computadores, de modo que destacan, aunque en un solo aspecto.

Es interesante constatar, también, que para que el computador pudiese ganar al juego del GO, la estrategia de los programadores fue simular, en ese computador, redes neuronales que eran capaces de aprender y ser entrenadas en distintos juegos. Cuando se les preguntó a los programadores del computador cómo fue posible que la máquina le hubiera ganado al campeón chino, estos no lo sabían. A diferencia de estos supercomputadores, nuestros cerebros son muy hábiles en una infinidad de distintas tareas y situaciones. Es un órgano complejo no solo por la extrema competencia que puede adquirir en una tarea, sino por la enorme riqueza y flexibilidad que despliega en situaciones nuevas.

Aquí podemos apreciar otra diferencia importante entre un cerebro y un computador. La memoria en un computador es parte del *hardware*, es decir, de un componente físico donde se guarda el valor de un número en forma binaria —es decir, los valores solo son 0 y 1—. La forma física en que esta memoria se mantiene en un computador varía, y en general incluye una parte volátil llamada RAM, así como otros componentes, como los discos duros. En cada uno de estos dispositivos, el valor de un elemento de la memoria se encuentra representado en un objeto físico (un interruptor) que posee un estado binario.

En el cerebro, la memoria no se guarda de forma física en un lugar especial, pues más bien consiste en la activación fisiológica de muchas neuronas repartidas en varias partes del cerebro y que forman una red neuronal. Usando el mismo ejemplo de un elemento visual, cuando uno ve una imagen, la experiencia visual resulta luego de la activación de varias partes del cerebro, proceso que ocurre de una manera distribuida, es decir, se requiere de la activación de varios circuitos neuronales. Ahora, para poder recordar esa imagen, el cerebro no extraerá información contenida en un solo lugar, sino que debe recrear la experiencia visual a partir de la activación de aquellas neuronas que fueron usadas durante esa misma experiencia visual.

Como podemos apreciar, la recolección de memorias implica volver a echar andar la maquinaria neuronal que dio origen a esa misma experiencia. Del mismo modo, cuando tenemos memoria sobre una emoción, se reclutan y activan circuitos neuronales que se encuentran involucrados en aquellas emociones, y cuando se recupera la información de una emoción se restaura, al mismo tiempo, la actividad eléctrica neuronal asociada, repitiendo, por tanto, la experiencia de esa emoción.

Este fenómeno tiene dos consecuencias importantes: por un lado, es posible constatar que la memoria humana es resistente al daño, debido a que se encuentra repartida por medio de la actividad de miles de neuronas. Por otro, la pérdida de una parte de la red o unas pocas neuronas no resulta necesariamente en la pérdida de toda la memoria. Es importante destacar, además, que cada vez que reactivamos este circuito de neuronas podemos modificar su actividad y, por lo tanto, la memoria. A diferencia de lo que ocurre en un computador, la memoria humana es frágil en sus contenidos y puede modificarse cada vez que la reactivamos. Al mismo tiempo, la constante reactivación de una memoria fortalece la red neuronal que la representa y mientras más reactivemos un recuerdo, más fuerte se hace en nuestro cerebro. Esto explica por qué nuestros recuerdos más antiguos tienden a ser también los más robustos.

Déjà vu

De seguro a todos nos ha pasado que estamos en una situación que consideramos nueva y, sin embargo, nos coge un potente sentimiento de familiaridad y de memoria, la cual nos brinda la certeza de que, aunque la situación sea completamente nueva, ya hemos pasado por ella. Por ejemplo, vamos por primera vez a la casa de un amigo y tenemos esta fuerte sensación de que ya hemos estado allí, o experimentamos que algunas personas han dicho exactamente lo mismo que ya vivimos en algún otro momento. ¿De dónde procede esta experiencia?

Déjà vu es una expresión que proviene del francés y significa «algo ya visto». Esta se refiere a cierta experiencia con la cual pareciera que hubiéramos predicho el futuro. Esta sensación la reportan más del 60 por ciento de las personas y en general es un evento mental estereotipado que no tiene consecuencias. La

neurociencia ha estudiado este fenómeno y ha concluido que es una rareza inocua del proceso de memoria. Esto quiere decir que las memorias que aparecen en el *déjà vu* no se acompañan con detalles claros de dónde, cómo y por qué la experiencia previa ocurrió. Se ha observado mediante técnicas de imagenología que este acontecimiento activa de manera intensa las redes neuronales que participan en la memoria y en las emociones. Otra evidencia que demuestra que estos «recuerdos» son el resultado de la activación de los mecanismos de memoria del cerebro tiene que ver con que la experiencia del *déjà vu* puede ocurrir como consecuencia de una manipulación con drogas o a través de la estimulación eléctrica directa en algunas regiones del cerebro. También se sabe que estos ocurren preferentemente en personas que tienen entre quince y veinticinco años. A su vez, estos fenómenos mentales, cuando son frecuentes y duran mucho tiempo, tienden a estar asociados con la epilepsia del lóbulo temporal.

¿Es posible combinar los cerebros con los computadores?

A pesar de que tanto los cerebros y computadores funcionan de diferente manera, las interacciones entre estos dos sistemas son cada día más frecuentes. Por un lado, la neurociencia ha utilizado por décadas los computadores para estudiar el cerebro humano e incluso se han utilizado máquinas para simular fenómenos que ocurren en el cerebro. Por otro, se han desarrollado e implementado programas que simulan unidades funcionales como las neuronas del cerebro y sus impulsos eléctricos, al punto de que es posible recrear sus conexiones y los cambios asociados a su actividad. Estas simulaciones han permitido que los computadores tengan la capacidad de aprender ciertas tareas e incluso de realizar operaciones que creíamos reservadas a los humanos, como volar un

avión o producir música clásica.

En el área donde la convergencia entre cerebros y computadores ha tenido un desarrollo inesperado es en la medicina, donde se ha buscado ayudar a personas que han perdido algunas capacidades del sistema nervioso. Por ejemplo, en los casos de personas que han perdido la habilidad de moverse debido a lesiones de la médula espinal, las cuales afectan a la comunicación entre el cerebro y los brazos y piernas, o que han perdido algunas de sus extremidades. En estas personas, la actividad del cerebro está intacta y también su capacidad de generar la actividad neuronal para efectuar estas acciones, pero no las pueden realizar, a causa de la interrupción de la comunicación. Esta nueva área de la medicina, donde se combina la neurociencia y las ciencias de la computación, es conocida como el área de las Interfases Cerebro-Maquina.[13] Lo que se busca es poder combinar la capacidad del cerebro con la capacidad de computadores para realizar operaciones que normalmente hacemos sin ayuda cuando estamos sanos.

A partir de investigaciones recientes se ha logrado que pacientes con daño medular impedidos de mover los músculos que tienen más abajo del cuello puedan usar su cerebro, ayudados por conexiones computacionales, para lograr moverse. En pacientes que han perdido brazos o piernas, el cerebro puede manejar directamente el movimiento de un brazo robótico. En estos estudios, los investigadores han insertado dentro de los cerebros de esos pacientes diversos cables, los cuales posibilitan la percepción de la actividad eléctrica de cientos de neuronas del cerebro, particularmente de aquellas áreas que están involucradas en la actividad muscular de brazos y piernas. Esta actividad eléctrica puede ser registrada por amplificadores y luego ser implementada en procesamientos computacionales en los cuales las máquinas, además de analizar, pueden calcular un movimiento muscular deseado, el que entonces es llevado a brazos robóticos, en caso de

pacientes que han perdido estas extremidades. En el caso de los pacientes con daño en su medula espinal, pulsos eléctricos pueden activar directamente los músculos de sus brazos o piernas. De esta manera, se ha podido combinar la actividad cerebral para poder ayudar a pacientes a realizar las conductas que han sido impedidas por traumas y lesiones.

¿Hasta dónde puede llegar este desarrollo? Es difícil afirmar eso hoy, pero es posible imaginar un futuro no muy lejano donde los pacientes puedan volver a caminar gracias a estas interfaces cerebro-máquina o que, por ejemplo, una persona pueda operar remotamente un robot con su mente y realizar una tarea peligrosa.

Inteligencia artificial

Como ocurre con muchos conceptos abstractos, el concepto de inteligencia es algo difícil de definir. El cerebro humano se caracteriza, en gran parte, porque tiene la flexibilidad para adaptarse a diferentes situaciones, por usar la lógica y el pensamiento crítico, o por su capacidad de aprender y crear, para resolver problemas de toda naturaleza. Recientemente, el concepto de inteligencia se ha expandido para considerar inteligencia no solo la habilidad de resolver problemas en matemáticas y otros dominios técnicos, sino también la habilidad de resolver problemas en múltiples dominios —sociales, artísticos, musicales o emocionales—. Por tanto, la inteligencia humana nos permite entender y adaptarnos al mundo, formular conceptos y lenguajes, comunicarnos con otros, hacer planes o crear cosas nuevas, entre otras numerosas conductas. Quizás es este rasgo el que más nos destaca por sobre el resto de los animales, donde si bien reconocemos la inteligencia como una de sus capacidades mentales, esta no parece exhibir la complejidad que logramos con nuestros

cerebros humanos.

La inteligencia es altamente valorada en nuestra sociedad. Ya sea que hablemos de inteligencia abstracta, musical o emocional, las personas que demuestran tener la habilidad de formar redes sociales, resolver problemas de matemática o ingeniería, componer música o efectuar negocios exitosos, son consideradas personas inteligentes. Ahora, independientemente del tipo de inteligencia que posea una persona, nuestros cerebros tienen una capacidad cognitiva limitada. Esto implica que la mayoría de las personas son razonablemente inteligentes en diferentes ámbitos, ya que debemos resolver problemas en un variado tipo de situaciones durante nuestra vida diaria. Dada la diversidad biológica y particularmente la plasticidad de nuestro cerebro, que permite modificar los circuitos de neuronas, algunas personas pueden mostrar una gran inteligencia en alguna dimensión de sus vidas. Esta probablemente requiere utilizar una importante cantidad de recursos cerebrales para lograr ese gran nivel, por lo que también es probable que estas personas no tengan el mismo grado de inteligencia en muchos otros aspectos de su vida.

A pesar del valor y las consecuencias del impacto que tiene esta habilidad mental en contribuir a nuestras vidas y nuestra sociedad, nuestro cerebro tiene una capacidad limitada para proveernos de inteligencia. Por más que nos maravillemos de nuestras propias creaciones e ideas, siempre se encontrarán sujetas a las limitaciones biológicas y físicas de nuestro cerebro. No resulta extraño entonces que la comunidad científica tenga por objetivo la búsqueda de nuevas formas de obtener los beneficios de la inteligencia a través de sistemas mentales artificiales. Esto es lo que se conoce como Inteligencia Artificial o AI.

Durante la historia de la humanidad, el hombre ha buscado expandir sus capacidades físicas. Desde la invención de las herramientas hace más de 2,5 millones de años, hemos inventado y

fabricado herramientas para elaborar ropa, comida y abrigo, para movernos mejor, o para ver o escuchar mejor. Más recientemente, hace un par de miles de años, inventamos las máquinas, o dispositivos mecánicos, que aumentaron o remplazaron nuestra capacidad de trabajo físico. Estas máquinas pueden utilizar fuentes de energía como el calor, el viento o la fuerza hidráulica. Hoy forman parte de nuestra vida diaria, y pueden realizar nuestras actividades físicas igual que nosotros, e incluso mejor. Sin embargo, en estas últimas décadas, la humanidad, por primera vez en su historia, ha alcanzado la posibilidad de usar máquinas para remplazar nuestras capacidades mentales. Usando herramientas provenientes de la matemática, de la ingeniería eléctrica y de la computación, así como de la neurociencia, los humanos hemos construido máquinas que vuelan aviones, hacen diagnósticos médicos, identifican rostros, deciden a quién dar un préstamo bancario o cuándo comprar o vender acciones en la bolsa. Las máquinas inteligentes pueden ver mejor, tener una memoria más poderosa, comparar y clasificar cientos de objetos a la vez, o jugar ajedrez mejor que el campeón mundial, por lo que cabe preguntarse: ¿cuál es el límite de estas máquinas inteligentes?

La inteligencia artificial se ha inspirado en el funcionamiento de las redes de neuronas del cerebro humano, pero hasta ahora solo realiza operaciones más bien simples. Los algoritmos de AI usan hoy redes de neuronas que resuelven problemas a través de la modificación de las conexiones entre los elementos de esta red, proceso que consiste en una serie de láminas o capas hechas de neuronas virtuales. Estas redes aprenden sobre la base de la información que les entregan los entrenadores. Esta información, acerca de los errores que cometen en una tarea particular, les permite cambiar las conexiones para minimizar este error en una interacción posterior. Si bien esto se asemeja medianamente a la manera en que aprende un cerebro, un algoritmo de AI puede

obtener este aprendizaje de forma extremadamente rápida y además puede procesar mucha más información simultáneamente, en contraste con lo que puede hacer un cerebro humano. En la medida que conozcamos más sobre cómo funciona nuestro cerebro y se desarrolle más la computación y la electrónica, las máquinas inteligentes podrían tener capacidades más parecidas a las de los humanos.

Las máquinas inteligentes no funcionan en la actualidad como lo hace nuestro cerebro, y tampoco es necesario que lo hagan. Quizás las ciencias de la computación pueden descubrir otras maneras de lograr que los algoritmos de las máquinas inteligentes emulen todas las capacidades mentales que hoy tenemos los humanos. Más importante aún es entender que estas tecnologías ya funcionan entre nosotros y que invadirán cada aspecto de nuestra existencia.

Si bien no es sofisticada la manera en que operan los algoritmos en las máquinas actuales, estas ya realizan de manera más rápida y mejor varios aspectos de nuestra actividad mental. La inteligencia artificial desplazará puestos de trabajo humanos, tomarán decisiones de carácter público y privado, afectando no tan solo nuestras vidas, sino también nuestra propia identidad como seres humanos. Si las máquinas remplazan trabajos, ¿qué tipos de trabajos serán más rápidamente remplazados?

La AI tendrá, por tanto, un desconocido impacto en nuestra sociedad, el cual incluye desde aspectos laborales hasta éticos y filosóficos. Si la AI puede tomar mejores decisiones, ¿qué tipo de decisiones les entregaremos a estos algoritmos? Si les entregamos todas las decisiones a estas máquinas, ¿llegaremos a ser los seres humanos organismos obsoletos? ¿Quién controlará y cómo se implementarán algoritmos de AI y cómo nos aseguraremos de que sean equitativos para todos y no incluyan sesgos ni discriminaciones? ¿Cómo protegeremos la privacidad y al mismo tiempo obtendremos los datos para una buena toma de decisiones

de la AI? Tendremos que usar nuestros propios cerebros para responder a estas preguntas.

EL CEREBRO Y LA EDUCACIÓN

El cerebro en continuo aprendizaje

La neurociencia afirma que nuestro cerebro construye la realidad que experimentamos a partir de estímulos que activan los órganos de los sentidos. Sin embargo, la experiencia sensorial depende, asimismo, del modo en que el cerebro aprende a interpretar la actividad que ocurre en los órganos sensoriales. No basta tener ojos para ver, u oídos para escuchar, y es que las habilidades perceptuales son en gran medida habilidades adquiridas. Es por ello que nos encontramos bastante familiarizados con el hecho de que un bebé no sea capaz de moverse bien y que requiera de práctica para poder moverse de forma adecuada. Estos logros ciertamente llevan bastante tiempo para concretarse. En contraste, suponemos que porque un bebé tiene ojos es algo suficiente para ver o porque tiene oídos es capaz de oír. Sin embargo, la actividad de la luz que llega a sus ojos no necesariamente produce la misma experiencia visual que para un adulto, esto porque toma un tiempo para que el cerebro interprete y construya apropiadamente lo que le llega a los ojos en un proceso perceptual coherente y relevante.

En su libro *Un antropólogo en Marte*, Oliver Sacks relató la historia de Virgil, quien había sido convencido por su novia para que se operase de la vista. Virgil tenía cataratas desde los diez años, por lo que era una persona prácticamente ciega. Para el hombre, que entonces tenía cincuenta años, después de la operación, sacarse los vendajes significaba una gran expectación. Sin embargo, cuando abrió los ojos, no tenía idea de qué era lo que miraba; había luz, había movimiento y había color, todo mezclado, todo sin sentido. Entonces salió una voz de alguna parte que dijo: «¿Y bien?». Entonces —y solo entonces— comprendió que ese caos de luces y sombras debía ser una cara. Aunque recuperó el

funcionamiento de sus ojos, el cerebro de Virgil no podía integrar y comprender lo que veía. Las imágenes no tenían sentido, no eran los objetos familiares que él conocía tan bien a través de sus otros sentidos. ¡Virgil había olvidado cómo ver! Después de muchos meses, frustrado y deprimido por un lento aprendizaje y por problemas de salud, Virgil ya no se apoyaba en su limitada visión y comenzó a recurrir con mayor frecuencia a su familiar experiencia de tacto y audición.

Como ejemplifica esta historia, no basta que en la retina de nuestros ojos se proyecte cierta imagen para que uno vea. Se requiere además que el cerebro relacione la forma, color y movimiento de lo que ve con la actividad que simultáneamente proviene de otros sentidos y de la memoria. Este proceso no es en absoluto pasivo, sino que, en todo momento, el cerebro compara, clasifica y selecciona esta experiencia sensorial con percepciones previas, en un continuo e interminable aprendizaje. Como la gran mayoría de las personas inicia este proceso de aprendizaje perceptual desde su nacimiento, nos parece que lo que somos capaces de hacer con nuestros sentidos es una propiedad innata de nuestros cerebros y, por tanto, no somos conscientes de su constante desarrollo a lo largo de nuestras vidas. Es solo en circunstancias especiales, como en el caso de Virgil o en pacientes con trastornos perceptuales, que esto es revelado y nos entrega una espléndida ventana al mundo interno de la función cerebral.

Así como aprendemos a caminar, a mover brazos y piernas o a hablar durante nuestra edad temprana, también aprendemos a ver, a escuchar y a tocar. Esto ocurre porque estas experiencias requieren modificaciones de circuitos en el cerebro asociados a los continuos cambios que ocurren en los órganos de los sentidos. Este proceso continúa durante toda la vida, pues nuestro continuo aprendizaje —que ocurre a través de la interacción entre el medio y los cambios en el cerebro— nos permite modificar aquello que

uno escucha, siente u observa a través de toda la vida.

¿Qué cambios ocurren en nuestros cerebros durante nuestra infancia y adolescencia?

¿Por qué es importante la relación que existe entre el cerebro y la educación? Durante nuestro aprendizaje —que se extiende durante toda nuestra vida, desde que nacemos hasta que morimos—, el órgano que mayormente está involucrado en este proceso no es sino el cerebro. El aprendizaje, en términos neurocientíficos, no es otra cosa que la modificación de conexiones en nuestro cerebro. Aprender el modo en que estos procesos ocurren y cómo son modificados por diversas circunstancias resulta de especial relevancia durante la niñez y adolescencia. Este conocimiento es esencial para el diseño de políticas educativas, así como para las propuestas educativas en el aula.

Durante las últimas décadas, la neurociencia ha revelado mecanismos del cerebro que son centrales en el proceso de aprendizaje. Estos avances han provenido de estudios de la conducta y de la fisiología del cerebro realizados con humanos y animales. En este contexto, uno de los más importantes aportes de la neurociencia a la educación ha sido entender el proceso de cambios anatómicos y fisiológicos que ocurren en el cerebro y sus conexiones durante el desarrollo, sobre todo porque la mayor parte del proceso educativo ocurre durante los mayores e intensos cambios en la estructura y conectividad del cerebro humano. Este órgano tiene un plan genético de modificaciones en su estructura que se inicia antes de nacer, pero continúa durante muchos años, finalizando alrededor de los 25 años de vida. De esta manera, hay una enorme ventana de cambios sobre los cuales se realizan los procesos educativos. Estos cambios que ocurren durante el

desarrollo están programados por la expresión de los genes que tenemos en cada una de nuestras células, en particular de las células del sistema nervioso. Al mismo tiempo, estos cambios ocurren como consecuencia de nuestra experiencia durante la vida temprana. Ambos tipos de cambios son en extremo importantes, de manera que alteraciones en la expresión de genes o experiencias de vida muy diversas producen cerebros más diferentes entre las personas. En términos de la estructura del sistema nervioso, es interesante constatar que el número de neuronas que tiene nuestro cerebro fueron gestadas antes de nacer. Una vez que nacemos, y durante el resto de nuestras vidas, todavía se generan algunas pocas neuronas más, pero solo en dos estructuras del cerebro. En el caso de un adulto solo se sabe que hay neurogénesis —el proceso de generación de nuevas neuronas— en el hipocampo, que es una parte del cerebro que se encuentra involucrada en el proceso de memoria, y en el bulbo olfatorio, parte del sistema neuronal que nos permite oler.

Un fenómeno natural y común en nuestro cerebro es la pérdida de neuronas. Durante toda la vida nuestro cerebro va reduciendo su número. Cuando alcanzamos la edad de 80 años, habremos perdido entre el 2 al 5 por ciento del total de neuronas, lo que evidencia una reducción del tamaño de nuestro cerebro a través de nuestra vida. De hecho, se estima que cada día perdemos más de 9 mil neuronas. Por cierto, en algunas ocasiones este proceso se convierte en algo patológico, donde a causa de algunas enfermedades neurodegenerativas puede acelerarse o aumentarse este proceso. Esto ocurre con el Parkinson, la enfermedad del Alzheimer, la esclerosis lateral amiotrófica (ALS), o con el mal de las vacas locas (Creutzfeldt-Jakob), entre otras enfermedades. A pesar de lo trágico que nos puede parecer esta constante pérdida de neuronas, nuestro cerebro siempre cuenta con muchísimas otras para poder realizar su función. Además, es importante saber que las neuronas son solo

una parte de lo que el cerebro necesita. Un gran número de neuronas nos permite una mayor riqueza de conductas, pero también son importantes el número y el tipo de conexiones que existen entre ellas.

Una neurona puede tener desde unas pocas hasta miles de conexiones, las cuales conocemos como «sinapsis». El número de sinapsis que las neuronas pueden establecer depende de una serie de factores, siendo el más importante la cantidad de actividad que exhibe cada neurona. Luego de nacer, cerca de los tres meses de edad, el cerebro humano muestra el mayor número de conexiones sinápticas. A partir de ese momento, se van refinando el número de conexiones, para ir formando circuitos neuronales funcionales que puedan aprender y realizar diferentes conductas. A veces, este proceso se caracteriza como una «poda» de sinapsis.

Ahora sabemos que en las cortezas cerebrales involucradas en el procesamiento de la actividad sensorial existe un refinamiento más temprano de las conexiones. Otras siguen este proceso de forma tardía. Las cortezas cerebrales que requieren más tiempo para madurar son las prefrontales y frontales, asociadas a funciones ejecutivas y a la toma de decisiones, es decir, aquellas que se encuentran involucradas en el manejo de la conducta humana más compleja. Esta última maduración ocurre hasta más allá de los 20 años, con lo cual queda en evidencia el enorme y complejo proceso de aprendizaje y maduración cerebral que ocurre en los humanos, quizás el proceso cerebral más largo de todos los animales. Durante este proceso pueden ocurrir eventos genéticos o de experiencias de vida que alteren el desarrollo típico. En algunos casos, y a través de modificaciones del patrón de desarrollo genético, esto tiene como resultado que, en cerebros diferentes, estos eventos impidan o dificultan la ejecución de conductas comunes, como puede ocurrir en el espectro autista, en la esquizofrenia, o en trastornos motores y del habla, entre otros. La neurociencia aún no conoce por

completo cómo ocurren. Sin embargo, existe consenso en que el plan genético que establece la estructura y conexiones del sistema nervioso, así como su maduración en las primeras décadas de la vida, puede sufrir alteraciones producto de factores intrínsecos, pero también por factores externos; por tanto, es modificable si es que se dan ciertas situaciones o condiciones externas.

El desarrollo del cerebro es, como vemos, bastante susceptible a cambios en la experiencia y en el medioambiente en el cual este se desenvuelve. Aunque son menos conocidos, estos aspectos, los cuales pueden perecer sutiles en la experiencia de un niño, como la deprivación de estimulación sensorial temprana, o la deprivación de interacción social, tienen un impacto importante en el modo en que se forma nuestro cerebro, y en particular, la corteza cerebral. Al respecto, en un estudio a cargo del doctor Thomas Eluvathingal, de la Universidad de Ohio, se afirma que aquellos niños privados socioemocionalmente, como resultado de su incorporación a un orfanato, muestran una reducción en el desarrollo de ciertas cortezas cerebrales, y que estas modificaciones podrían explicar alguna de las dificultades cognitivas-emocionales observadas en ellos.[14]

Plasticidad neuronal

Los cambios que ocurren en el cerebro durante nuestra etapa de desarrollo y en la vida adulta se basan principalmente en la modificación de las conexiones o sinapsis entre neuronas. Esta propiedad característica del cerebro referida al cambio de conexiones se conoce como «plasticidad neuronal». Esta modificación se refiere a las conexiones que hacen las neuronas, más que a la pérdida o la aparición de estas. La mayor parte de los mecanismos neurobiológicos que conocemos sobre plasticidad

siempre hacen referencia a la modificación de las conexiones y la funcionalidad de las neuronas que se encuentran en distintas partes del cerebro.

La plasticidad neuronal es un fenómeno que ocurre durante toda la vida de los individuos, pero que tiene una mayor intensidad durante de los primeros años. Nuestro conocimiento sobre lo que ocurre con la plasticidad neuronal proviene de estudios en los cuales se ha medido el tipo de actividad que muestran diferentes neuronas tanto en personas como en animales cuando sufren cambios importantes en el modo de percibir el mundo, a causa de un daño sensorial o por un entrenamiento sensorial intenso. En otras palabras, la plasticidad neuronal se refleja primariamente cuando se observan las consecuencias de las modificaciones sensoriales. En una serie de estudios realizados en los años ochenta, se investigó qué ocurría en animales que pierden algún órgano sensorial como, por ejemplo, el oído. Al examinar las regiones del cerebro que están involucradas en el procesamiento de estímulos auditivos, no se observaron cambios físicos importantes, es decir, las neuronas lucían iguales a las de idénticas regiones cerebrales de un animal. Sin embargo, aunque no mostraron una respuesta a estímulos auditivos, sí lo hicieron a estímulos visuales. Estos estudios advirtieron que las neuronas de la corteza cerebral auditiva que, en el desarrollo típico de esos animales, responden a estímulos auditivos, se habían desarrollado como neuronas que se activaban mediante estímulos provenientes de la vista. Estas neuronas de la corteza auditiva, que podrían haberse quedado silentes por no poder recibir estímulos del oído, estaban procesando estímulos visuales. En estos animales, por tanto, una mayor cantidad de neuronas del cerebro participaba de la percepción visual en comparación con un animal normal y, por tanto, exhibía mejores capacidades visuales.

Este cambio dramático que puede ocurrir temprano en el

desarrollo cerebral también se observa en humanos. Algunas técnicas de imagenología permiten visualizar la magnitud de la actividad neuronal en una persona mientras realiza diferentes actividades. Personas que son sordas de nacimiento y que son observadas con estas técnicas, demuestran que las cortezas que normalmente se debieran utilizar para escuchar, se encuentran estructuralmente intactas y que no son usadas para el procesamiento auditivo. En su lugar, se ha observado que estas cortezas se activan durante el procesamiento de estímulos visuales, particularmente en aquellas personas sordas de nacimiento que utilizan lengua de señas. Las cortezas «auditivas» se activan, por tanto, durante esta conducta de comunicación visual. Es por esta razón que en estas personas, sordas de nacimiento, la cantidad de cerebro que está involucrado para el procesamiento de señales visuales es muchísimo más grande que el de una persona con un desarrollo típico. Consecuentemente, se podría esperar que las habilidades visuales de una persona sorda sean probablemente más enriquecidas que la de una persona con desarrollo típico, pero asumiendo el costo de carecer de la modalidad sensorial auditiva. Algo parecido ocurre en personas que son ciegas de nacimiento. Una parte importante de nuestro cerebro está dedicado al procesamiento visual. De hecho, somos animales bastante visuales considerando la gran cantidad de cerebro que tenemos para procesar este tipo de estímulos. En personas ciegas de nacimiento o que han perdido la vista a temprana edad, la estructura básica de sus cortezas visuales se encuentra intacta y es indistinguible de la de una persona normal. Con frecuencia, las personas ciegas utilizan sus cortezas visuales para un procesamiento en la modalidad somatosensorial o táctil. Asimismo, se ha observado que, en estas personas, la actividad cortical está relacionada con la conducta de leer un texto en relieve o sistema braille. Este sistema de lectura, creado por el francés Louis Braille en 1824 después de quedar ciego

por un accidente ocurrido en la adolescencia, requiere una capacidad sensorial del tacto muy fina. Las personas que leen braille activan las cortezas «visuales» y otras partes del cerebro que típicamente se activan con el procesamiento visual. En personas ciegas de nacimiento todos estos recursos están dedicados, por tanto, al procesamiento de estímulos táctiles. Uno solo puede entonces imaginar la riqueza en la sensibilidad y discriminabilidad táctil de una persona ciega, en contraste con el de una persona de desarrollo típico. De la misma manera, debiéramos esperar que los estímulos visuales puedan procesarse en formas más complejas y potentes en una persona sorda, y al revés, con mayor complejidad auditiva en una persona ciega.

Por tanto, es importante destacar que el cerebro humano en general y su corteza cerebral en particular, tienen la capacidad de ejecutar diferentes funciones, dependiendo de la actividad en que sean ocupadas. Aunque es limitado en cantidad de neuronas, es al mismo tiempo flexible y plástico. Es por ello que nuestra conducta puede ser tan diversa y compleja.

¿Existe plasticidad neuronal en personas adultas?

El cerebro humano, hemos visto, está en permanente cambio. Durante la niñez y adolescencia este proceso es intenso, ya que, con cada aprendizaje y experiencia, nuestro cerebro modifica las conexiones entre las neuronas. Este fenómeno permite armar los circuitos necesarios para ejecutar conductas relevantes y, así, mantener la homeostasis en nuestro medioambiente. La plasticidad es una propiedad fundamental que ha permitido al ser humano adaptarse a la enorme diversidad de circunstancias que le ha tocado vivir. Es por ello que nuestro cerebro aprende las conductas necesarias para sobrevivir en el desierto más seco y al mismo

tiempo en el polo norte y por diversas etapas históricas. Nuestro cerebro es, básicamente, el mismo desde hace más de 200 mil años: una enorme red flexible de neuronas. Esta flexibilidad para generar circuitos que sirven para diferentes conductas es lo que hace en parte, a nuestro cerebro, tan especial. Asimismo, esta plasticidad se observa también en muchos otros animales, especialmente en aquellos que tienen un cerebro más parecido al de los humanos. En varios estudios con animales, donde se ha investigado y determinado la actividad de neuronas individuales en la corteza, se ha observado que la plasticidad neuronal, que se expresa como un cambio en las conexiones de las neuronas, depende de la actividad de estas.

Las investigaciones realizadas en esta área exploraron la actividad neuronal en la corteza somatosensorial. Esta contiene neuronas que se activan cuando se estimulan los sensores que tenemos en la piel. Como ocurre en otros órganos de los sentidos, la distribución de estas neuronas sensoriales no es homogénea. Tenemos muchísimos sensores del tacto en las manos, especialmente en la yema de los dedos, en contraste con el codo, por ejemplo. En consecuencia, una gran cantidad de neuronas ubicadas en la corteza somatosensorial se activan cuando usamos las manos, y muchas menos neuronas lo hacen cuando usamos nuestros codos. Incluso, en esta corteza, es posible diferenciar las regiones donde están las neuronas que se ocupan de cada dedo de la mano. Es esta característica la que ha permitido observar y aprender qué ocurre con estas neuronas en caso de cambios producidos en los sensores.

En uno de los primeros estudios en plasticidad neuronal se observó, por ejemplo, que en algunos monos que pierden o se dañan un dedo, las neuronas de la corteza cerebral que reciben las señales de los sensores del dedo perdido se mantenían silentes por un tiempo. Sin embargo, al examinar de nuevo esas neuronas

después de algunas semanas, los científicos descubrieron que ya no estaban inactivas y respondían a estímulos que llegaban desde los dedos próximos al dedo perdido. Esto muestra que las conexiones que llegan a las neuronas de la corteza cerebral pueden modificarse, y si algunas se pierden, otras pueden reforzarse, por lo que estos cambios plásticos permiten mantener el cerebro ocupado, aunque no necesariamente en la misma actividad. Este mismo tipo de plasticidad neuronal se observa en humanos que por algún accidente o enfermedad han perdido parte de sus dedos o manos, o incluso el brazo. Tras varios meses desde la pérdida de un brazo, se ha observado que el cerebro, que antes respondía a la actividad de aquella extremidad, ahora lo está haciendo a regiones adyacentes del cuerpo como, por ejemplo, el rostro. La clave de estos cambios parece centrarse en las modificaciones de las conexiones entre las neuronas, donde aquellas que se mantienen activas son capaces de generar nuevas conexiones o reforzarlas. En este caso, las neuronas que recibían señales sensoriales del brazo ahora solo lo hacen desde regiones adyacentes, y siendo estas las únicas activas, tienden a aumentar sus conexiones, transformado esta región cortical en una que responde a regiones adyacentes.

Por fortuna, estos cambios no ocurren solo cuando nos enfrentamos a situaciones traumáticas, sino que forman parte de un proceso fisiológico normal en el cerebro. Sabemos esto porque se han realizado experimentos y estudios en animales donde, por ejemplo, se ha buscado examinar qué ocurre con las neuronas de la corteza sensorial en una situación donde se favorece el uso de alguna parte específica de la mano. En un estudio realizado por el doctor Michael Merzenich, especialista en el campo de la plasticidad neuronal, se entrenó a un mono para que utilizara la punta de sus dedos con el propósito de recibir una recompensa.[15] Luego de varios meses, se observó que la cantidad de neuronas asociadas a la actividad de la punta de los dedos estimulados había

aumentado significativamente. Esto implica que muchas más neuronas de esa parte del cerebro ahora estaban involucradas en el procesamiento de estímulos que llegaban desde esos dedos. Recordemos que la corteza cerebral no genera nuevas neuronas en la corteza, por lo que la plasticidad neuronal aquí resulta en una redistribución de las neuronas existentes. Es decir, la misma cantidad de cerebro reparte sus recursos dependiendo del uso que le damos a nuestro sistema sensorial. En el caso descrito, los animales usaron de forma intensa la punta de los dedos en desmedro del uso de otras partes de la mano, por lo que el cerebro cambió, dedicándoles mayor cantidad de neuronas a esos dedos y menos cantidad de neuronas a otros.

Un proceso semejante podría esperarse en situaciones donde hay pérdida de neuronas en la corteza, como ocurre en los infartos cerebrales. En este caso, las neuronas restantes modifican su actividad para ajustarse a las nuevas demandas de procesamiento y es posible, entonces, hallar plasticidad neuronal que posibilite la restauración de parte de las capacidades perdidas. Sin embargo, estas partes nunca se recuperan de forma completa, porque la cantidad de corteza existente es menor.

La plasticidad cortical implica que nuestro cerebro se encuentra en permanente cambio, y los recursos neuronales que utilizamos son repartidos de acuerdo al nivel de actividad que tengamos en los circuitos. Es posible esperar, entonces, que una persona que hace un enorme y frecuente uso de las manos tenga una mayor representación de esa parte del cuerpo, en contraste con la representación de otras partes. La plasticidad también implica que diferentes personas siempre van a tener cerebros diferentes, porque a través de nuestra vida y nuestra experiencia dedicamos nuestro tiempo a distintas tareas. Este uso y desuso tiene consecuencias en la manera en que el cerebro reparte sus recursos, aumentando el número de neuronas dedicadas a aquello que hacemos con mayor

frecuencia y en desmedro de aquello que hacemos con menor frecuencia; esto se debe a que los recursos del cerebro son limitados. Producto de estas y otras limitaciones energéticas, no es posible tener un cerebro más grande y tampoco es posible disponer de una mayor cantidad de recursos dedicados a muchas cosas distintas. Esto imposibilita que uno sea hábil y competente para un sinnúmero de habilidades diferentes. La plasticidad neuronal es, hemos podido apreciar, parte de lo que explica la maravillosa diversidad de talentos y habilidades que encontramos en cada uno de nosotros.

Sinapsis

Las redes neuronales funcionan principalmente en base a la actividad eléctrica de cada una de las neuronas y a la actividad presente en los miles de conexiones que existen entre ellas. Estas redes pueden variar de acuerdo al número o la intensidad de las conexiones que establecen las neuronas, es decir, a la sinapsis. Una misma sinapsis puede aumentar en intensidad y provocar un mayor cambio neuronal. Estas redes dependen directamente de la actividad neuronal, es decir, las neuronas que mantienen una mayor actividad eléctrica inician fenómenos celulares que aumentan el crecimiento de la sinapsis y el número de contactos entre ellas. Asimismo, provocan que las sinapsis existentes se refuercen y sean más potentes. El crecimiento de nuevas conexiones y reforzamientos son mediados por señales celulares que gatillan cambios en la expresión de proteínas en las neuronas y en sus células vecinas. También es importante hacer énfasis en que la plasticidad neuronal no siempre implica un aumento de conexiones y refuerzo de sinapsis. Los mecanismos inversos también se observan, cuando las neuronas dejan de activarse o

reducen su actividad. Como consecuencia, el número de conexiones de estas neuronas se reduce o la fortaleza e intensidad de la sinapsis decrece.

La relación entre el aprendizaje y la memoria

En estas últimas secciones he descrito procesos que se relacionan con el ámbito educativo, pues tienen relación con la comprensión de los mecanismos neurobiológicos a través de los cuales podemos aprender. Un esfuerzo importante de la neurociencia en esta línea ha estado dedicado a entender el modo en que ocurre el aprendizaje y su relación con la memoria. El primero es un concepto biológico que está relacionado con el cambio de conducta observada en un organismo frente a una misma situación. Es, en otras palabras, el proceso a través del cual se modifican conductas, las cuales incluyen actos motores o perceptuales, así como de toda la actividad cognitiva. El aprendizaje, además, puede ocurrir a través de distintos mecanismos que en general agrupamos dentro del concepto de memoria. Ambos conceptos se encuentran relacionados y si bien hay debate en la comunidad neurocientífica acerca de cómo se relacionan con exactitud estos dos términos, en principio vamos a considerar aquí a la memoria como el conjunto de mecanismos biológicos que permiten o subyacen al aprendizaje. En estos términos, podemos partir con dos consideraciones fundamentales. La primera es que el aprendizaje y todos los mecanismos de memoria involucran modificaciones físicas o fisiológicas de la actividad cerebral. En algunos casos, donde el aprendizaje y la memoria tienen corta duración, los cambios que se aprecian en el cerebro están asociados con la modificación de la actividad neuronal en curso. Esta memoria es conocida como «memoria de trabajo» y ocurre, por ejemplo, cuando estamos

haciendo una suma matemática o cocinando y debemos recordar por un periodo corto lo necesario para poder ejecutar esa tarea. Se ha visto que, en el cerebro, la memoria de trabajo funciona principalmente mediada por la activación transitoria de algunas neuronas en la corteza cerebral. Por otro lado, en el caso del aprendizaje que se mantiene por tiempos prolongados —como saber la fecha de nuestro cumpleaños o dónde fuimos el verano pasado—, los mecanismos de memoria siempre involucran modificaciones físicas de los circuitos cerebrales. Esta memoria se conoce como «memoria explícita» o «memoria declarativa». Memorizar y aprender, en este caso, son actividades que requieren siempre de cambios estructurales en nuestro cerebro, es decir, cambios en el número de sinapsis y en la intensidad de estas conexiones.

Un segundo aspecto importante sobre los procesos mentales asociados al aprendizaje es la variedad de mecanismos que la neurociencia ha logrado descubrir. Estos pueden involucrar cambios en distintas estructuras cerebrales. De esta manera, para aprender algunas conductas, utilizamos determinados circuitos, lo cual es importante para el ambiente educativo, ya que implica que no existe una sola manera de aprender las diferentes conductas y hechos. Basada en los circuitos cerebrales que están directamente involucrados en los diferentes tipos de aprendizaje, la neurociencia ha propuesto una clasificación en los tipos de memoria que pueden realizar tanto los humanos como otros animales. Algunos de estos aprendizajes son muy simples. Consideremos como ejemplo la «habituación». Esta consiste en la respuesta cada vez menos intensa frente a la repetición de un estímulo. Por ejemplo, si alguien cierra la puerta de golpe, la primera vez es probable que nos sobresaltemos, pero la segunda vez vamos a saltar menos, y si la persona lo hace todo el tiempo, probablemente pronto lo ignoremos. Este aprendizaje se asocia a un cambio en circuitos

sinápticos que es relativamente sencillo. En el otro extremo, aprendizajes muy complejos, como el operar una maquinaria retroexcavadora, aprender un idioma nuevo, aprender álgebra o geometría, recordar las fechas y los hechos de la vida de cada uno de nosotros, requieren cambios físicos en muchas áreas del cerebro. De nuevo: distintos tipos de aprendizaje pueden ocupar distintos circuitos. Para recordar nuestra fecha de nacimiento o la fecha del día de la independencia de nuestro país se requieren o involucran estructuras específicas del cerebro, como el hipocampo y la corteza cerebral. Si una persona tuviese problemas o lesiones en estas estructuras, su memoria se vería afectada.

Para profundizar en este asunto debemos saber qué ocurre en el hipocampo. Esta corteza que se localiza debajo de la corteza cerebral es una de las estructuras más estudiadas por la neurociencia respecto a su relación con la memoria, ya que está involucrada en varias tareas de esta última, entre ellas, en la facultad que nos permite recordar fechas y hechos sobre nuestra vida pasada. Esta memoria, que se denomina declarativa, se pierde cuando existe extenso daño en el hipocampo. En animales y personas que tienen este problema el daño impide la habilidad de formar memorias nuevas. Uno de los pacientes más famosos de la historia de la neurociencia, y que aportó enormemente a nuestro conocimiento de la memoria, tenía justamente daño en esta parte del cerebro.

Henry Molaison nació en Connecticut en 1926. A causa de una epilepsia que no respondió a ningún tratamiento, se le sometió a una cirugía que le removió dos tercios de su hipocampo y algunas porciones de su corteza cerebral. La cirugía fue exitosa en cuanto a la cura de su epilepsia, pero pronto se observó que este paciente dejó de recordar cualquier cosa nueva que hacía, o a la gente que conoció luego de la cirugía, incluyendo a sus doctores. Desde 1957 y hasta su muerte, ocurrida en 2008, participó como voluntario en

innumerables estudios de memoria, los que mostraron que efectivamente no podía recordar ningún nuevo evento en su vida, aunque sí podía recordar los eventos que habían sucedido antes de la cirugía. Esta condición se ha observado en varios pacientes y ha sido el tema de películas como *Memento*, de Christopher Nolan. La corteza cerebral también es importante en este tipo de memorias, por lo que cualquier daño en ella puede alterar o disminuir nuestra habilidad de recordar acontecimientos.

Aunque el hipocampo y la corteza son necesarios para aprender a recordar nuestra historia personal, el contenido de un libro o conceptos abstractos, no todos los aprendizajes ocupan estos circuitos cerebrales. Otro mecanismo de memoria, como la «memoria procedural», tiene que ver con la práctica de actividades físicas como, por ejemplo, andar en bicicleta. Nos podemos imaginar a alguien que va a la biblioteca, saca un libro sobre cómo andar en bicicleta, lo memoriza de inicio a fin y luego rinde un examen escrito al respecto, en el que logra sacar una nota perfecta. Sin embargo, si esta persona finalmente se sube a una bicicleta, es altamente probable que se caiga. Esto se explica porque los circuitos neuronales necesarios para aprender a andar en bicicleta son diferentes de los circuitos necesarios para aprender lo que sale en un libro. El mecanismo explícito, que mencionamos para recordar conceptos y eventos es diferente y por tanto no se puede utilizar para poder realizar los cambios físicos necesarios para andar en bicicleta.

Es así entonces que distintos tipos de aprendizaje pueden reclutar diferentes circuitos neuronales. Aunque parezca curioso, Henry Molaison podría haber aprendido a tocar el piano o a andar en bicicleta con precisión, pero si le hubiesen preguntado, habría dicho que jamás hizo nada parecido. Otro ejemplo de aprendizaje diferente y que recluta distintos circuitos fue mencionado anteriormente. La memoria de trabajo requiere principalmente la

participación o integridad de la corteza prefrontal y es una memoria que se ocupa solamente mientras una tarea está en curso. Por ejemplo, cuando se digita un número de teléfono, se debe recordar qué números ya fueron marcados para no repetirlos, o cuando se está cocinando, se debe mantener en la memoria qué ingredientes ya fueron agregados para no incluirlos dos veces. Luego me puedo olvidar de la secuencia de acciones que realicé.

En el ámbito educativo, aquellas tendencias que señalan que no existe una sola manera de aprender sugieren el diseño de diferentes estrategias educativas para poder aumentar las posibilidades de aprendizaje, ya que para distintas conductas se deben reclutar diferentes circuitos cerebrales. Es por ello que la participación frecuente en distintos tipos de actividades parece ser también relevante para el aprendizaje de distintas habilidades y competencias.

¿Podemos aprender mientras dormimos?

Hugo Gernsback nació en Luxemburgo en 1884 y fue un inventor, escritor y editor de una revista de ciencia ficción. Sus contribuciones a este campo literario lo han hecho ser comparado con H. G. Wells y Julio Verne. De hecho, uno de los premios literarios más importantes en este género lleva su nombre: los Hugo Awards. Profesionalmente, Gernsback hizo contribuciones importantes en radio y televisión. En 1911, por ejemplo, publicó un breve relato donde mencionaba el hipnobioscopio, un dispositivo que permitía aprender durante el sueño. Esta idea fue conocida con el nombre de hipnopedia. La idea de que nuestro cerebro puede aprender cosas mientras aparentemente no está realizando ninguna tarea, ha sido explorada numerosas veces. En particular, son notables una serie de experimentos realizados en Rusia durante la

segunda parte de la década de los sesenta, de los que se publicaron varios resultados positivos. Sin embargo, la neurociencia moderna no ha podido replicar esos estudios, así que hoy no existe evidencia robusta que permita afirmar que es posible aprender algo durante nuestro sueño. Algunos sitios de internet que ofrecen herramientas para aprender inglés mientras se duerme se encuentran notablemente desprovistos de información que demuestre su eficacia científica. Sin embargo, un estudio reciente realizado en 2012 mostró que era posible obtener un aprendizaje muy sencillo que asociaba olores a un estímulo visual.[16] Otro estudio, publicado este año, muestra que, durante algunas etapas específicas del sueño, es posible recibir estímulos que son recordados después. Asimismo, un tercer estudio[17] evidenció que después de que las personas aprendieron a realizar una tarea visual asociada con escuchar dos melodías, estas lo hicieron mejor luego de oír una de esas melodías durante el sueño.

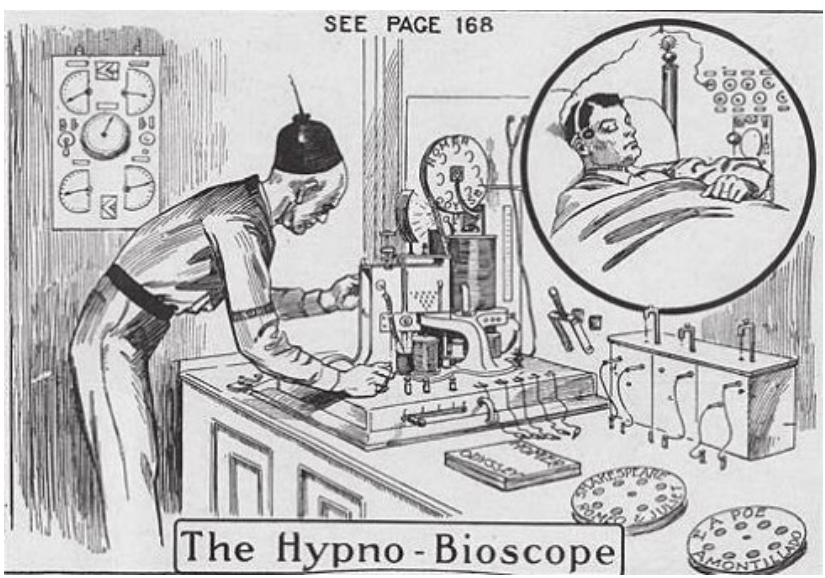


Figura 6. El hipnobioscopio de Gernsback, publicado en su revista *Modern Electrics* (1911). © *Wikimedia commons*

Por otro lado, evidencia neurocientífica muestra que, durante las distintas etapas del sueño, el cerebro tiende a desconectarse de los órganos de los sentidos y solo estímulos muy fuertes tienden a interrumpir el sueño. Al final, la hipnopedia no es más que un «neuromito». De eso hablaremos a continuación.

Los neuromitos y su impacto en la educación

Durante los últimos cincuenta años hemos aprendido una gran cantidad de cosas acerca del cerebro, sobre todo en los últimos veinte años. Sin embargo, en contraste con la enorme información sobre la complejidad del sistema nervioso, podemos decir que todavía sabemos poco acerca de cómo ocurren los procesos en el cerebro. Una estimación respecto de lo que conocemos sobre la corteza cerebral visual primaria —que es quizá una de las estructuras del cerebro más estudiadas en el ser humano y en los animales— afirma que se conoce no más del 15 por ciento de lo que ahí ocurre. Si uno extiende esta afirmación a todo el resto del cerebro, basándose en la cantidad de estudios realizados, se puede sostener que no conocemos más del 5 por ciento de lo que ocurre en nuestro cerebro. Esto nos pone frente a un enorme desafío, pero también es una situación fértil para que afirmaciones sin fundamento o que no han sido científicamente consolidadas se establezcan como verdades colectivas.

Es por ello que una afirmación que se sustente en información científica incompleta constituye la base de lo que llamamos «neuromitos». Estos son creencias erróneas o sin fundamento que relacionan hallazgos en neurociencia. La ciencia avanza a pasos pequeños y algunos descubrimientos pueden ser exagerados más allá de su interpretación adecuada o es posible encontrarse con una idea que tiene una mejor explicación por razones diferentes.

Muchas de estas ideas o mitos se expanden con rapidez a la comunidad y se transforman en conocimiento robusto, cuando no lo son, considerando el desconocimiento que existe sobre los procesos del cerebro. Al divulgar hallazgos científicos a través de la prensa, muchas veces se simplifica o exagera lo informado. Los neuromitos son ideas equivocadas o infundadas sobre los procesos mentales y, por lo tanto, cuando se toman de manera literal, pueden resultar en la adopción de estrategias educativas inadecuadas con resultados inciertos.

Algunos de los neuromitos que típicamente son incluidos en la sala de clase incluyen la idea de que adultos y niños usan preferentemente uno de los dos lados (hemisferios) del cerebro y que esta opción puede ser utilizada para un aprendizaje más eficiente. También se piensa que es útil enseñar a los niños según su estilo de aprendizaje, que niños y niñas aprenden de manera diferente, que hay periodos críticos para poder aprender ciertas cosas, que usamos una cantidad limitada de nuestro cerebro, que un niño puede aprender solo un idioma a la vez, o que se puede aprender mientras se duerme. Es importante destacar que la mayoría de la evidencia neurocientífica surge de experimentos controlados y limitados, y por lo tanto tiene validez solo en el ámbito del laboratorio. Para que un descubrimiento pueda ser validado en una sala de clase deben realizarse adicionalmente estudios pilotos para determinar si los mismos resultados son observables en el contexto escolar. Esto ocurre rara vez y, por tanto, estos descubrimientos no obtienen validación.

El efecto Mozart

Para ilustrar el modo en que estas creencias nacen y luego se consolidan en la mentalidad colectiva de la sociedad, recurriré a un

ejemplo bastante popular: el efecto Mozart. Durante las últimas décadas del siglo pasado, el investigador francés Alfred Tomatis, un otorrinolaringólogo, realizó una serie de estudios para mejorar la audición de sus pacientes; entre otras tareas, desarrolló unos dispositivos para mejorar la audición y otros problemas, incluyendo dislexia, depresión, esquizofrenia e incluso autismo. El doctor Tomatis tenía la idea de que el cuerpo estaba involucrado en el lenguaje y el habla, y de alguna manera llegó a la conclusión de que la música de Mozart era particularmente efectiva en ayudar a resolver estos problemas. Finalmente terminó publicando el libro *Por qué Mozart*, donde promovía estas ideas.

La actividad científica del doctor Tomatis nunca fue respaldada por publicaciones científicas. Un año después de la publicación de *Por qué Mozart*, Frances Rauscher, Gordon Shaw y Catherine Ky, investigadores de la Universidad de California, publicaron un estudio en *Nature*, una de las revistas científicas más importantes del mundo. En este estudio, los investigadores le pidieron a un grupo de participantes que realizaran una prueba de atención espacial de razonamiento abstracto, luego de haber experimentado una de tres condiciones: i) escuchar una sonata para dos pianos en Re Mayor K 488 de Mozart, ii) recibir instrucciones verbales para relajarse o iii) guardar silencio, sin ninguna instrucción. En su estudio se encontraron con que los sujetos que escuchaban la música de Mozart mostraron un aumento en la atención espacial, lo cual se medía a través de valores de coeficiente de inteligencia. Se demostró también que este aumento era solo temporal, ya que, a los quince minutos de haber realizado la tarea, este efecto tendía a desaparecer. Como ocurre con muchos artículos científicos, la prensa informó acerca de estos hallazgos y Alex Ross, del *New York Times*, escribió un artículo sobre esta investigación. En su reporte, el periodista ocupó el título: «Investigadores del Centro para la Neurobiología del Aprendizaje y la Memoria en la Universidad de

California han determinado que escuchar a Mozart en realidad te hace más inteligente». Claramente, el reportero no estaba mintiendo. En una tarea específica, el haber escuchado esa pieza de música estaba asociado a un mejor rendimiento. Pero, al mismo tiempo, el titular sugiere algo diferente, referido a que escuchar música de Mozart incrementa las habilidades cognitivas en aspectos generales, lo cual *no fue* una de las conclusiones del trabajo. Tampoco el reportaje hizo mención de la naturaleza transitoria del efecto. A partir de esta publicación, se produjo una especie de «juego del teléfono» donde la información fluye de una fuente a otra y en cada etapa va alejándose más de lo que decía originalmente. Así es como esta creencia se ha extendido hasta hoy, llegándose incluso a sugerir que las madres embarazadas debieran escuchar a Mozart. Está idea tomó impulso, replicándose por varios estratos de la sociedad, desde músicos hasta políticos que recomendaban que todas las personas, particularmente los bebés, se beneficiarían en su desarrollo mental escuchando a Mozart. Incluso en Estados Unidos el gobernador de Georgia, Zell Miller, emitió un proyecto de ley en 1998, asegurando que cada madre de un recién nacido recibiría un disco compacto de música clásica de cortesía. Ese mismo año, el gobierno estatal de Florida aprobó una ley que requería que guarderías financiadas por el estado tocaran al menos una hora de música clásica al día. A pesar de los atractivos de la afirmación de que la música de Mozart nos hace más inteligentes, esto nunca se pudo confirmar. Lo descrito anteriormente llevó a uno de los investigadores originales, Frances Raucher, a sostener en 1999 que «jamás hemos hecho la afirmación de que escuchar a Mozart aumenta la inteligencia». En otras palabras, lo que ocurre es que una tesis exagerada o basada en evidencia débil puede transformarse rápidamente en una verdad colectiva si esta resulta atractiva y es tomada de manera liviana por científicos, reporteros y otros miembros de la sociedad.

Por supuesto que el efecto Mozart es solo un ejemplo de numerosos neuromitos que persisten en el mundo de la educación. En esta área, los neuromitos cobran mayor gravedad, porque existe el riesgo de considerar estas afirmaciones como evidencia científica que permitiría modificar o formular políticas educativas que pueden tener un impacto importante en nuestra sociedad.

¿Por qué el conocimiento neurocientífico no se ha trasladado más rápidamente a la sala de clases?

He descrito en párrafos anteriores que los neuromitos y otras creencias que han abordado de manera errada la relación entre las neurociencias y la educación han sido uno de los motivos principales por los que el conocimiento neurocientífico no ha sido fácil de implementar en las salas de clases. Existen varias otras razones por las cuales este proceso ha sido lento. Una de ellas tiene que ver con los distintos propósitos generales de estas disciplinas: la neurociencia y la educación no han buscado lo mismo; más bien tienen objetivos muy diferentes, en la medida que ambas disciplinas han buscado respuestas o han construidos modelos teóricos en niveles explicativos que no se intersectan. Daniel Willingham, profesor de psicología de la Universidad de Virginia, lo llama el «problema vertical».[18] Cada fenómeno o problema que la ciencia quiera explicar, lo debe hacer al nivel donde se ha identificado el problema. Por ejemplo, para describir las propiedades de un gas, no podemos hacerlo solo haciendo referencia a las propiedades de un átomo. En neurociencia no es posible, por ejemplo, explicar una emoción humana haciendo referencia solo a genes y proteínas. Las emociones surgen en un individuo y en un contexto condicionado por las interacciones de este con el ambiente. Una explicación de las emociones debe incluir

un mecanismo que, cuando opera, da origen a la conducta que entendemos por emoción. Por supuesto, estas conductas requieren de una serie de otros fenómenos. La neurociencia, sin embargo, explica qué redes neuronales cerebrales se activan durante procesos como la atención, el aprendizaje de una tarea motora o la activación de una emoción. Sin embargo, estas explicaciones nos dicen poco sobre cómo esto se traslada a la conducta de un individuo, especialmente, en su ambiente natural.

En suma, las explicaciones que se construyen en neurociencia y en el ámbito de la educación tienen validez solo en el entorno y al nivel desde donde se realizan las explicaciones. Otra manera de explicar lo anterior se representa en el esquema de la figura 7.

En esta figura se representan los niveles explicativos como anillos insertados uno dentro de otro. Los niveles más centrales son el foco de la neurociencia, mientras que los más externos son aquellos de interés en el ámbito educativo. Daniel Willingham sugiere, en esta línea, que una convergencia entre estas dos áreas será más eficiente y exitosa a medida que se tengan expectativas más realistas. Por un lado, los educadores no debieran esperar que la neurociencia sea prescriptiva. Esto significa que esta última no puede, basada en su conocimiento actual, dar instrucciones precisas o reglas acerca de cómo debe realizarse el proceso educativo, particularmente en el ambiente del aula y en las relaciones sociales. La neurociencia da explicaciones detalladas respecto a cómo un individuo se comporta, lo que ve o cómo se mueve, y esas explicaciones refieren a áreas específicas del cerebro, a determinadas células y genes, pero no ayudan mucho a entender cómo estas conductas son moduladas por las interacciones sociales o el medio ambiente.

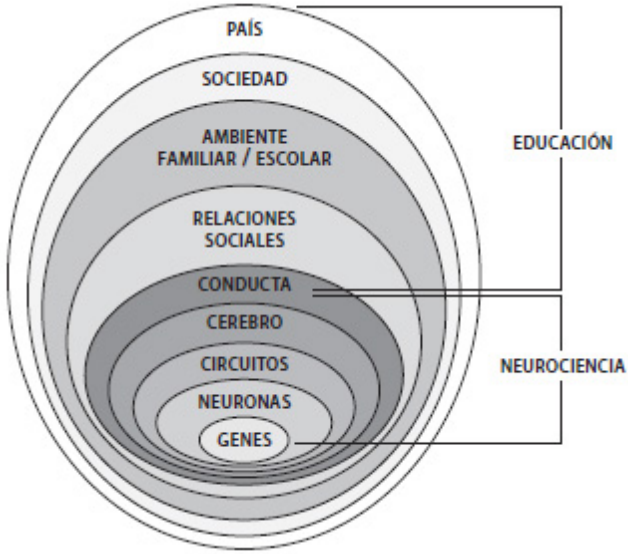


Figura 7

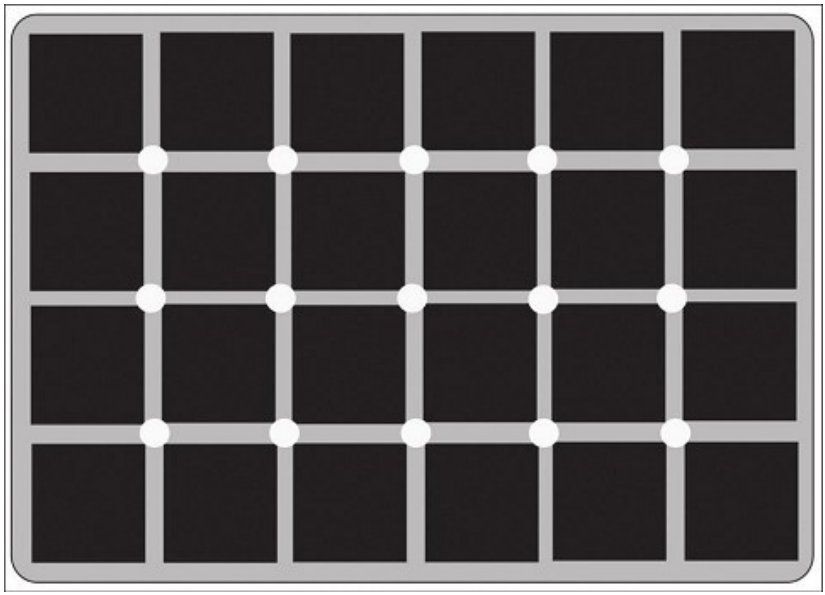
En general, la neurociencia entrega evidencias sobre los mecanismos finos de conducta individual. Esta disciplina ha buscado entender sobre todo cómo las personas aprenden, atienden a un estímulo o duermen, pero este conocimiento solo tiene sentido en el ámbito educativo cuando puede ser insertado en un contexto de teorías pedagógicas bien desarrolladas. Sin duda, esto requiere investigación conjunta y complementaria, combinando la actividad científica sobre el cerebro con la investigación en el aula. En consecuencia, tanto los neurocientíficos como los educadores se beneficiarían de un conocimiento interactivo, el cual implicaría, a fin de cuentas, una significativa contribución en los procesos educativos.

LAS CAPACIDADES DEL CEREBRO

¿Percibimos de manera fiel la realidad?

Desde el punto de vista biológico, el cerebro cumple un rol fundamental, el cual consiste en contribuir a la «homeostasis» del cuerpo, es decir, la condición estable de un organismo y su medio interno. Este término fue acuñado por el fisiólogo norteamericano Walter Cannon en 1926, siguiendo los conceptos del fisiólogo francés Claude Bernard. La totalidad de procesos neuronales que ocurren en nuestro cerebro contribuyen a mantener y regular nuestra conducta, así como los distintos procesos fisiológicos del resto del cuerpo. Para lograr esto, el cerebro tiene que interactuar con el medio donde se mueve su cuerpo y así mantener la integridad fisiológica. Esto significa que con nuestro cerebro tenemos que ser capaces de responder a los cambios que ocurren en el medio ambiente y entonces realizar las conductas que sean necesarias para mantenernos vivos. Para lograr esta homeostasis, el cerebro debiera representar fielmente el mundo en que nos movemos y vivimos.

En este contexto, se consideraba que nuestros sentidos eran efectivamente capaces de poder capturar de manera fiel y apropiada el mundo. Sin embargo, esta idea contrasta con nuestra experiencia diaria de percepciones ambiguas, ilusorias o que simplemente ignoramos por completo. Consideremos un ejemplo que nos servirá para aclarar varios aspectos de percepción visual.



Si el lector mira por algunos segundos la figura que aparece arriba, es probable que tenga la experiencia de ver dentro de cada círculo blanco, un círculo negro. Pero este último desaparece cuando fijamos nuestra mirada en uno de ellos. Si el lector tuviera que responder a la pregunta «¿Cuántos círculos negros se encuentran en la figura?», es probable que, así como la gran mayoría de las personas que se ven enfrentadas a esta pregunta, conteste: «Ninguno». Afirmamos que no hay ninguno porque al mover nuestros ojos estos círculos negros desaparecen. Al mismo tiempo, ante la pregunta «¿Ve círculos negros?», estoy seguro de que el lector respondería afirmativamente. Esto nos plantea una seria contradicción lógica. Con igual certeza decimos que vemos algo pero que, «en realidad», no existe. Ahora, levante la vista y observe su entorno por unos segundos. ¿Cómo sabe que lo que ve es realmente parte del mundo físico que nos rodea? ¿Está seguro? Pareciera que no siempre lo que vemos corresponde a la realidad física. ¿Es esto algo que el cerebro hace en forma frecuente?

Consideremos ahora una situación muy común, como lo que

ocurre cuando el lector explora visualmente algún objeto o paisaje, por ejemplo cuando observa por unos segundos la tapa de este libro y luego retoma su lectura. Lo que el lector ve mientras mira la tapa del libro es una imagen con letras y dibujos, que parece estar ahí, quieta y estable. Una de las cosas que quizás no nota es que, mientras examina la tapa del libro, sus ojos se mueven, y lo hacen de una parte a otra de la imagen, unas tres o cuatro veces por segundo. Esto significa que la luz que proviene de la tapa del libro forma una imagen en el fondo de su ojo, pero esta imagen en su retina dura ¡solo una cuarta parte de un segundo!, y luego el ojo se mueve nuevamente a gran velocidad sobre otro punto del libro. Este permanente movimiento de la vista y su detención en un punto por una fracción de segundo implica que cada vez que movemos los ojos debiéramos experimentar una imagen visual borrosa, para luego ver una imagen quieta por otra fracción de segundo, y así sucesivamente. Sin embargo, esto no es lo que manifestamos cuando describimos nuestra experiencia. En otras palabras, lo que ocurre en el ojo, producto de la luz que ahí llega, no es necesariamente lo que experimentamos como el acto de «ver». Más bien, la experiencia visual es una construcción mental. El cerebro «construye» una experiencia visual con lo que les llega a los ojos, pero no es fiel a lo que ahí ocurre. Esta diferencia entre lo que ocurre en nuestros órganos sensoriales y la vivencia perceptual ocurre de manera parecida en todos los órganos de los sentidos. Lo que a nosotros nos parece el «mundo real» es una construcción de nuestros cerebros, una mezcla del producto de la llegada de estímulos a nuestros sentidos y la actividad del cerebro que debe realizarse para mantener la homeostasis.

Sin embargo, no vaya a pensar el lector que vivimos en permanente ilusión. Si así fuera, probablemente no hubiéramos sobrevivido como especie por mucho tiempo. Lo que la neurociencia manifiesta es que cada animal o persona usa su

cerebro para armar un mundo lo más cercano a lo que necesita cada organismo para mantener su homeostasis. Y para lograr esto no necesita una captura fiel del mundo sino una captura relevante para sus necesidades. La idea de que es el cerebro el que construye, en parte, el mundo que experimentamos implica una consecuencia importante. Entender lo que nosotros percibimos como mundo es una cuestión única para cada uno de nosotros, que nos obliga a considerar nuestra propia experiencia, tan válida como la experiencia de cualquier otra persona. Las diferencias de opinión sobre la realidad que puedan tener distintas personas, en parte se debe a los mundos diferentes que creamos cada uno en nuestro cerebro.

Si el cerebro «construye» nuestro mundo, y en principio todos los cerebros son idénticos, resulta esperable que también lo sean nuestras experiencias y aprendizajes. En otras palabras, todos deberíamos ver, escuchar, oler o tocar lo mismo. Sin embargo, los cerebros no son idénticos. Nacemos con una variabilidad estructural que proviene de la variabilidad genética y, por ello, el cerebro de una persona jamás será idéntico al de otra persona. Además, nuestro cerebro se encuentra en constante cambio producto de nuestras experiencias sensoriales y aprendizajes. Aunque estamos muy familiarizados con la diversidad biológica respecto a muchos aspectos físicos de los seres humanos, como el color de piel, la altura o la forma de las caras, todavía puede parecer una sorpresa para muchos que hasta los órganos de los sentidos son diferentes en distintas personas. Por ejemplo, los receptores de luz que tenemos en los ojos no son iguales en todos nosotros. Algunos tienen más receptores de un tipo que de otro, y como consecuencia, aunque el resto de nuestro cerebro fuera idéntico, nuestra percepción de colores sería diferente. No existe manera, entonces, de saber si el color «naranjo» que yo veo de un objeto es el mismo que observa la persona que se encuentra a mi

lado. La única certeza que ambos tenemos es que aprendimos a llamar a esa experiencia perceptiva con el mismo nombre. Un ejemplo extremo de lo anterior es lo que ocurre con las personas con daltonismo, quienes no poseen uno de los tipos de receptores del ojo, por lo que ven el mundo de manera completamente distinta que los demás. También los receptores de nuestra nariz son diferentes, de manera que algunas personas pueden oler cosas que otras no pueden, solo porque tienen algunos receptores distintos. Mientras más diferentes son nuestros órganos de los sentidos y nuestro cerebro, más distinto será el mundo que experimentamos sensorialmente.

La diversidad biológica tanto de nuestros órganos sensoriales como del cerebro implica que, en la medida que estos últimos son distintos y nuestros órganos sensoriales van cambiando, el «mundo» que nuestro cerebro es capaz de construir será, por tanto, diferente. Lo anterior resulta evidente cuando los humanos nos comparamos con otros animales. Un ave —por ejemplo, una paloma— tiene una enorme riqueza de receptores en sus ojos, y es al mismo tiempo capaz de ver colores de una manera mucho más amplia que la nuestra. En contraste, un perro tiene muy pocos tipos de receptores en los ojos y por lo tanto no es capaz de tener nuestra experiencia sensorial relacionada con ver colores. Sin embargo, el perro tiene un sinnúmero de receptores en el olfato y, por tanto, su mundo va a estar constituido por una enorme riqueza olfatoria y una menor riqueza visual. ¿Cuál es, entonces, el mundo real? ¿El que vemos, olemos y escuchamos nosotros o el que construye un perro, o el de una abeja que es capaz de ver luz en el rango ultravioleta, o el de un pez que es capaz de «observar» campos magnéticos?

Al final, lo importante es reconocer que, debido a las limitaciones de los órganos de los sentidos y de nuestros cerebros, ni los seres humanos, ni ningún otro animal es capaz de capturar fiel y completamente el mundo físico que nos rodea. Como vemos,

lo que sentimos es más bien una construcción mental que depende de cómo está hecho nuestro cerebro y de la historia de las interacciones que hayamos tenido con el mundo en el cual nos desenvolvemos. La función del cerebro no es generar una percepción fiel, sino una percepción adecuada para realizar las conductas contingentes y apropiadas para continuar vivos.

¿Por qué dormimos?

Cada noche, en promedio, los humanos dormimos aproximadamente siete u ocho horas. En ese momento nuestro cerebro y nuestro cuerpo desarrollan una actividad muy diferente de lo que ocurre durante el día. Buena parte de la razón por la cual dormimos tiene que ver con los ciclos de luz y oscuridad que ocurren cada 24 horas, debido a la rotación de la Tierra. Los humanos somos animales diurnos, es decir, animales cuya actividad está centrada durante el día, pudiendo aprovechar entonces las horas de oscuridad para descansar o recuperar energías. Sin embargo, responder a la pregunta sobre por qué dormimos es bastante más complicada.

La cantidad de luz y oscuridad que transcurre cada día no explica la diversidad del dormir en el reino animal. Si uno examina la cantidad de horas que duermen otros animales, encontraremos una amplia variedad. Las jirafas o los elefantes duermen menos de dos horas diarias, mientras que los murciélagos o los armadillos duermen casi veinte horas. Una respuesta parcial a esta pregunta tiene que ver con el consumo de energía. Recordemos que nuestro cerebro ocupa casi un quinto de la energía que produce el cuerpo. No obstante, lo que esta idea sugiere en un principio es que el cerebro estaría inactivo durante el sueño y, sin embargo, aquello no es cierto. Por el contrario, el cerebro se mantiene activo durante

toda la noche y más aún, tiene periodos de actividad muy distintos y no es clara todavía cuál es la relación directa entre estos distintos tipos de actividades y las necesidades fisiológicas del cuerpo.

Existe otro motivo para dormir, el cual pareciera ser relevante en animales con conductas complejas como las nuestras. Durante el sueño ocurren procesos fisiológicos significativos en el cerebro, necesarios para mantener nuestra salud mental y corporal. Por ejemplo, aquellos relacionados con la restauración y el equilibrio del sistema inmunológico. Se sabe que la deprivación de sueño conlleva un importante deterioro de la inmunidad y, por tanto, implica un aumento en las enfermedades. Otro aspecto sobre la relación entre el sueño y el cerebro es la consolidación del aprendizaje que ocurre durante el dormir. En ese momento se refuerzan los circuitos neuronales involucrados en el aprendizaje de nuevas conductas. Sabemos que, como consecuencia de este fenómeno, la deprivación de sueño o una mala higiene del sueño conllevan problemas de memoria. La neurociencia ha descubierto que durante distintas etapas del sueño el cerebro parece repetir las actividades que se han realizado durante el día, y esta repetición resulta en un reforzamiento de los circuitos neuronales asociados con ese aprendizaje. De manera que el sueño parece tener un rol crucial en los procesos mentales, en la medida que esta deprivación provoca daños importantes que van desde problemas de memoria hasta desequilibrios psiquiátricos.

Resulta alarmante, por tanto, el hecho de que en la actualidad el uso compulsivo de las tecnologías pareciera conspirar contra el sueño. En Estados Unidos, una encuesta reciente mostró que el 20 por ciento de los ciudadanos duerme menos que el número de horas recomendadas y que casi el 17 por ciento ha confesado que se ha dormido mientras manejaba. En Chile, un estudio de la Universidad Católica mostró que solo el 20 por ciento de los encuestados duermen entre 7 y 9 horas.[19] La Encuesta Nacional de

Salud, realizada en 2017, reveló que el 63 por ciento de los chilenos sospecha tener algún trastorno de sueño.[20] Buena parte de esta mala higiene del sueño tiene que ver con prácticas como ver televisión en los dormitorios o trabajar en el computador o navegar y chatear en los teléfonos celulares, lo que demora y dificulta el inicio del sueño. Asimismo, existe una gran tendencia entre los jóvenes referida a tener actividades sociales durante un número importante de horas en la noche, lo que reduce las horas efectivas de sueño. Por supuesto, el cuerpo y cerebro buscan siempre el equilibrio, por lo que esta falta de sueño constituye una deuda fisiológica, la que con frecuencia se paga los fines de semana con un aumento en las horas de sueño. Sin embargo, muchas veces esto no es suficiente, y se establecen deudas crónicas de sueño, con las consecuencias ya mencionadas.

¿Por qué soñamos?

Si bien dormimos varias horas, esta actividad no es una cosa que hacemos de manera uniforme durante toda la noche. De hecho, solamente un 20 por ciento de este tiempo lo pasamos soñando. Durante el resto dormimos sin soñar, poniendo nuestro cerebro en distintos modos de funcionamiento. Cuando nos quedamos dormidos entramos a una etapa liviana de sueño que dura entre cinco y diez minutos. Luego entramos a una segunda etapa más profunda, donde nuestra frecuencia cardíaca disminuye y nuestra temperatura baja aproximadamente un grado. Esto explica por qué muchas veces cuando nos despertamos sentimos frío. No es porque estuviéramos destapados, sino porque el cerebro y el cuerpo buscan recuperar ese grado adicional de temperatura y la sensación de frío acompaña los procesos fisiológicos que hacen subir nuestra temperatura corporal. De esta segunda etapa pasamos a una de

sueño profundo, donde es más difícil despertar y, si alguien lo hace, le tomará unos minutos restaurar completamente su lucidez. Luego de una hora y media desde que nos hemos quedado dormidos recién vamos a entrar en un período de sueño donde podremos soñar. Esta etapa se conoce como la etapa del sueño de movimientos oculares rápidos (MOR, o REM, en inglés), ya que a lo largo de ella la conducta de nuestros ojos es similar a la que adoptan cuando estamos despiertos. Es posible notar que una persona está en esta fase del sueño porque mueve los ojos como si estuviera efectivamente «mirando» sus sueños. Si a alguien se le despierta durante esta etapa es altamente probable que manifieste haber estado soñando. El cerebro, en ese lapso, tiene una actividad eléctrica semejante y prácticamente indistinguible de la actividad del cerebro de una persona despierta. Es por ello que ha recibido el nombre de «sueño paradójico». A diferencia de lo que ocurre cuando estamos despiertos, durante la etapa del sueño los músculos del cuerpo están completamente relajados. Es interesante constatar que el tiempo que gastamos cada noche en este proceso varía con la edad. Los bebés pasan prácticamente la mitad del tiempo en esta etapa y ello va reduciendo lentamente a medida que envejecemos.

Pero ¿qué función o propósito podría tener el sueño? La neurociencia aún no tiene una respuesta concreta. Por un lado, se piensa que los sueños permiten ordenar la enorme cantidad de actividad realizada durante el día y así mantener o descartar algunas de estas memorias. Esta idea proviene de la evidencia que muestra que personas que pasan más tiempo en el aprendizaje de alguna tarea durante el día, sueñan más tiempo en la noche. Otras propuestas sugieren que los sueños permiten revisitar algunos problemas o situaciones importantes, que se analizan repetidamente, para que en una próxima oportunidad se realice una conducta más apropiada o para encontrar la solución a un problema. Finalmente, otros proponen que los sueños no son sino

un juego o ensayo al azar del cerebro para explorar las potenciales conductas a las que uno podría verse enfrentado, haciendo así una especie de simulación mental. En todo caso, los sueños en general parecen ser una colección de eventos muy cortos e incoherentes. Cuando nos despertamos, nuestra mente une todos estos pedazos y tratamos de darle un hilo conductor con un mínimo de lógica y coherencia. Por ahora, los sueños siguen siendo un atractivo misterio para la neurociencia.

Hemisferios cerebrales

Como el resto del cuerpo, el sistema nervioso en general y el cerebro en particular tienen una simetría bilateral. Esto quiere decir que tienen muchas partes que se duplican al lado izquierdo y al lado derecho, como los pulmones, brazos y piernas y órganos de los sentidos, entre otros. Si bien no todo el cerebro es duplicado y simétrico, es llamativo respecto a la corteza cerebral y el cerebelo. Si se parte todo un cuerpo humano en dos, se obtendrán dos partes muy parecidas. Como ocurre también con algunas otras partes del cuerpo, las dos mitades del cerebro no serían necesariamente idénticas. En el caso del cerebro, las diferencias serán en menor parte anatómicas, pero principalmente funcionales. Esta asimetría en la participación de los circuitos de cerebro en distintas conductas se conoce como «lateralidad». Uno de los rasgos más lateralizados es la actividad sensorial y motora en la corteza cerebral. La parte izquierda de los hemisferios cerebrales participa fuertemente en procesamientos neuronales asociados a lo que ocurre al lado derecho del cuerpo. Inversamente, la parte derecha del cerebro tiene que ver con lo que está ocurriendo en el lado izquierdo del cuerpo. Sin embargo, es importante recalcar que, al mismo tiempo, estas dos partes se encuentran altamente

interconectadas a través de neuronas cuyos cables o axones atraviesan de un lado al otro el cerebro. Otras funciones o actividades son asimétricas y se encuentran altamente lateralizadas. Una de las más conocidas es la actividad neuronal asociada al lenguaje, que se encuentra normalmente, en la mayoría de las personas, al lado izquierdo del cerebro más que al lado derecho. Esta propiedad de lateralidad se encuentra bien documentada. Sin embargo, como ocurre con muchos mitos, estos hallazgos se extienden a extremos como afirmar que las funciones cerebrales se encuentran completamente segregadas hacia un lado del cerebro o el otro. Este mito surge porque se confunde una preferencia con exclusividad. Para la mayoría de las conductas, el cerebro requiere la participación de ambos hemisferios.

Uno de los investigadores pioneros en comprender cuál era la relación entre la actividad neuronal de ambos hemisferios cerebrales, fue el investigador norteamericano Roger Sperry, quien obtuvo el Premio Nobel en 1981 por sus estudios sobre el cerebro. Sperry estaba interesado en entender la especificidad de las conexiones neuronales. En sus estudios observó que, si uno aprendía algo con un ojo cerrado y el otro abierto, luego podría realizar esta tarea cambiando el ojo abierto por el ojo cerrado. Dedujo así que esta transferencia de hemisferios cerebrales del aprendizaje debía ocurrir por las conexiones que hay entre ambos hemisferios. En estudios en animales demostró, a su vez, que, si se interrumpían estas conexiones, el aprendizaje ya no se transfería de un hemisferio a otro. Junto a Michael Gazzaniga, Perry empezó a estudiar pacientes que, por razones médicas, particularmente la presencia de epilepsia intratable, requerían de una cirugía correctiva para evitar estos ataques. Los investigadores se dieron cuenta que, en pacientes que habían sido sometidos a esta operación, los hemisferios cerebrales —ahora separados— procesaban de manera distinta diferentes estímulos, lo que

consolidó la idea de que estos dos componentes de cerebro podían trabajar en forma separada.

De ahí en adelante se descubrieron asimetrías funcionales que cada uno de los hemisferios cerebrales tenía con respecto al pensamiento, la creatividad, la emocionalidad o la capacidad de aprender matemáticas. Estos descubrimientos llevaron a algunas personas a pensar que algunas de las funciones y capacidades mentales estaban alojadas exclusivamente en uno de los dos lados del cerebro. Hasta se llegó al extremo de proponer que la preferencia por tener gatos o perros como mascotas se debía a la actividad dominante de uno de los dos hemisferios. No fue una sorpresa que, luego de eso, se propusiera entrenar mejor algunas habilidades cognitivas a través de métodos de enseñanza, los cuales buscarían llegar específicamente a uno u otro lado del cerebro.

Sin embargo, en los últimos diez años, y por medio de avanzadas técnicas de imagenología de la actividad cerebral, se ha demostrado que estas afirmaciones son infundadas porque si bien existe actividad lateralizada en muchas conductas, al mismo tiempo se requieren y reclutan circuitos cerebrales de diversas partes del cerebro. Incluso respecto a conductas clásicamente consideradas como muy lateralizadas, tales como el lenguaje o la actividad matemática, las técnicas de imagenología han demostrado que se requiere efectivamente combinar la actividad simultánea de muchas áreas cerebrales en lo que ahora se considera que es el funcionamiento de «redes neuronales».

Los cerebros de hombres y mujeres son diferentes

Quizás esta afirmación no debiera sorprendernos. Muchas partes del cuerpo de hombres y mujeres muestran diferencias: tenemos distintas caderas, distintos patrones en la distribución de cabello,

metabolismo, o procesos hormonales, solo por nombrar algunas características. En un hombre de peso promedio, el cerebro mide 1260 centímetros cúbicos (cc), es decir, un poco más de un litro. En una mujer con similar peso promedio, su cerebro mide 1130 cc, un 10 por ciento más pequeño. Estas diferencias que se conocen como el fenómeno de «dimorfismo sexual», ocurren también en casi todos los otros animales. Por lo tanto, es esperable que nuestro cerebro, cuya función es contribuir al equilibro fisiológico del cuerpo, también sea diferente. Diversos estudios han encontrado diferencias importantes en la morfología de los cerebros de hombres y mujeres. Es el caso de la distribución de los químicos que participan en la comunicación neuronal. El neurotransmisor conocido como serotonina es un ejemplo de ello. Al mismo tiempo, las mujeres tienden a tener, en promedio, un poco más gruesa la corteza cerebral, mientras que los hombres tienen un tamaño mayor del hipocampo. Los hombres también muestran un mayor tamaño en la amígdala, una estructura que se asocia a la conducta emocional y toma de decisiones, el estriado que participa en el aprendizaje y procesamiento de recompensa, y el tálamo que tiene participación en la actividad sensorial. Sin embargo, cuando se ajustan estas diferencias al tamaño del cuerpo, se muestran mucho más pequeñas. Una de las cosas interesantes sobre el dimorfismo sexual del cerebro es que hay mayor variabilidad en la morfología del cerebro de las mujeres que en el caso del de los hombres. Probablemente, el lector ya habrá pensado, o supuesto, de manera inconsciente, que estas diferencias en tamaño promedio necesariamente se ven reflejadas en diferencias significativas en algunas de las habilidades mentales entre hombres y mujeres. Nuestra natural inclinación a realizar esta suposición es la que da origen a algunos mitos, pero con frecuencia la evidencia nos desmiente.

A pesar de estas y muchas otras diferencias, tanto bioquímicas

como respecto al tamaño del cerebro y a las conexiones que existen entre las diferentes regiones de este órgano, quizás la pregunta que queremos hacernos no es tanto qué diferencias hay, sino qué es lo que implican y si se traducen en las habilidades mentales que asociamos con el concepto de inteligencia. Esta segunda pregunta es mucho más compleja de contestar. Por un lado, es cierto que existen numerosos estudios que han demostrado diferencias en habilidades entre hombres y mujeres, incluyendo visualización espacial, matemáticas, lenguaje y memoria de trabajo. No parece haber evidencia científica fuerte para concluir, sin embargo, que algunas de las diferencias en habilidades cognitivas encontradas entre hombres y mujeres impliquen de forma necesaria que personas de un sexo sean más inteligentes que las otras. En general, se encuentra una enorme superposición en las habilidades en todas las capacidades cognitivas, pero que alcanzan diferencias estadísticas en algunos rasgos, como el manejo fino de las manos o el lenguaje, donde las mujeres obtienen, en promedio, mejores puntajes que los hombres, mientras que estos últimos muestran una pequeña ventaja para el manejo de objetos en tres dimensiones o memoria de trabajo. Sin embargo, cuando se examinan habilidades cognitivas que relacionamos con la resolución de problemas como las matemáticas, estas diferencias son más difíciles de encontrar. Metaestudios, investigaciones donde se recopilan datos de decenas o centenas de trabajos pueden ser más iluminadores.

Janet Hyde, psicóloga de la Universidad de Wisconsin, publicó con sus colegas en 1990 un metaanálisis que recopiló datos de cien estudios diferentes sobre rendimiento matemático, donde comparaban a más de tres millones de participantes.[21] Los investigadores no encontraron grandes diferencias generales entre niños y niñas. En cuanto a la capacidad verbal, Hyde y sus colegas informaron que los datos de 165 estudios revelaron una ventaja femenina que no era estadísticamente significativa. En 2005, este

mismo grupo de investigadores revisó cuarenta y seis metaanálisis distintos sobre diferencias de sexo, no encontrando diferencias importantes en estilo de comunicación, variables sociales y de personalidad, conductas motrices y razonamiento moral. El mismo año Elizabeth Spelke, psicóloga de la Universidad de Harvard, revisó junto a sus colegas 111 estudios, concluyendo que las diferencias de género observadas en las habilidades matemáticas y científicas tienen una base en las diferencias genéticas entre mujeres y hombres.[22] A pesar de estas pequeñas diferencias, en la práctica, hombres y mujeres en general poseen la misma aptitud para las matemáticas y la ciencia.

¿Qué da lugar a esta controversia de resultados? Por un lado, es extremadamente difícil excluir varios factores que pueden contribuir a las diferencias encontradas. Estos factores incluyen desde prejuicios, fallas metodológicas, o aún más importante, factores culturales o de crianza. Uno de los fenómenos que contribuyen a entender estas diferencias corresponde a la plasticidad del cerebro, cuya estructura no está definida solamente por la genética. El cerebro cambia continuamente durante nuestra vida y sobre todo producto de la experiencia, de manera que, si hombres y mujeres se educan o viven distintas experiencias (especialmente educativas), esto tendrá necesariamente consecuencias en la estructura cerebral. A su vez, muchas de las diferencias en el rendimiento cognitivo que se han encontrado en varios estudios en psicología entre ambos sexos tienden a desaparecer cuando las pruebas son realizadas luego de un entrenamiento idéntico.

Un ejemplo interesante sobre el impacto de la educación y los estereotipos lo encontramos en un estudio de tres investigadores del departamento de psicología de la Universidad de Arizona, Michael Johns, Toni Schmader y Andy Martens.[23] En este estudio tomaron a tres grupos de niñas y niños de características similares

Al primer grupo de niños y niñas se les hizo un examen que se les presentó explícitamente como un examen de matemáticas. Luego de analizar los resultados, observaron que los niños tuvieron un mejor rendimiento en esta prueba. Seguidamente, estos investigadores realizaron la misma prueba con un segundo grupo de niñas y niños, pero en esta oportunidad no mencionaron la palabra matemáticas; solamente les informaron que era un ensayo de resolución general de problemas. En este caso, niños y niñas tuvieron exactamente el mismo rendimiento. Más interesante aún, los investigadores tomaron un tercer grupo de niños y niñas, realizando la misma prueba: esta vez, sin embargo, se les informó, como la primera vez, que este era una prueba de matemáticas, pero también se les advirtió sobre el prejuicio infundado de que las niñas eran peor para las matemáticas que los niños. Como resultado de esta intervención, el rendimiento de la prueba fue similar entre niños y niñas. Este estudio ejemplifica bastante bien el potencial impacto de la intervención social sobre el rendimiento en tareas cognitivas, y cómo la manifestación de capacidades intrínsecas en niños y niñas se ven enmascaradas por nuestros prejuicios culturales.

Quizás se deba hacer notar un hecho revelador. Según datos de la Unesco,[24] las mujeres constituyen la mitad o más de las personas que obtienen grados universitarios en el aérea de ciencias e ingeniería. Sin embargo, cuando avanzan en su desarrollo profesional y académico, la proporción se reduce, particularmente en puestos de responsabilidad y directivos. Las razones son múltiples e incluyen desde sesgos y discriminación cultural hasta el desafío que impone conciliar la maternidad con su actividad profesional.

¿Qué son las emociones y los sentimientos?

Las emociones, como muchas otras funciones mentales, tienen como principal propósito el contribuir a la homeostasis, es decir, a la mantención de los procesos fisiológicos que permiten a los organismos mantenerse con vida. Toda la actividad cerebral persigue o contribuye a ese fin. Las emociones no son otra cosa que estados mentales que surgen del cerebro. Estos estados mentales han sido objeto de preocupación de la humanidad desde la Antigüedad. Hipócrates decía que los hombres «deben saber que del cerebro y solo de cerebro surgen nuestros placeres, la alegría, la risa y las bromas, así como las penas, los dolores, las tristezas y las lágrimas». La emoción ha sido objeto de estudio desde esa época y muchos científicos se han interesado desde entonces en estas conductas. Entre ellos, encontramos a Charles Darwin, quien expuso una de las ideas más revolucionarias y fundamentales en la historia de la ciencia: la evolución animal. El científico inglés escribió un libro sobre la expresión de las emociones en el hombre y animales donde propuso que estas eran conductas ligadas a nuestra genética.

En términos generales, una emoción es un término general para describir la experiencia subjetiva consciente y se caracteriza principalmente por manifestarse como una alteración fisiológica con características conductuales específicas. Las emociones contribuyen a la homeostasis, indicando un cambio intenso en nuestro entorno o en nuestro estado mental. Una de sus características principales es su corta duración, a diferencia de los sentimientos o de las características de la personalidad. Una emoción, como estado de alta intensidad, dura generalmente unos segundos o minutos, mientras que un sentimiento puede durar horas o semanas. La función biológica de las emociones se presenta como un «llamado de atención», o se percibe como una situación urgente, un estado mental que nos obliga a tomar una decisión o un curso conductual inmediato. Por ejemplo, la furia nos puede

empujar a acciones agresivas. El miedo es una emoción que se establece por una amenaza real, o percibida, a nuestra integridad física como organismos y por lo tanto induce a tomar una acción, que en la mayoría de los animales se manifiesta como una conducta de congelamiento o de huida. De la misma manera, una alegría intensa nos lleva gritar o bailar. Las emociones, aparte de llevarnos a la realización de determinadas conductas, se manifiestan en cambios fisiológicos importantes, asociados a la actividad de una parte del sistema nervioso que se conoce como sistema nervioso autónomo. Los cambios de actividad en el sistema nervioso autónomo se evidencian en cambios como el pulso del corazón cuando estamos emocionados o la irrigación sanguínea en la piel cuando tenemos vergüenza. Con el miedo, por ejemplo, se nos erizan los pelos y se acelera el corazón. Con la sorpresa o el terror, cambia el tamaño de las pupilas.

Los sentimientos son estados mentales parecidos a las emociones, pero tienen menor intensidad y se prolongan por tiempos más largos. Son los estados mentales que duran una mayor cantidad de tiempo. Por supuesto, mantener un mismo sentimiento por periodos demasiados prolongados en el tiempo, como estar triste, o sentir ninguna emoción o ningún sentimiento por períodos largos, son todos síntomas de que algo está desbalanceado en nuestro cerebro.

Uno de los sentimientos que impacta sustancialmente a nuestra sociedad es la depresión. Este estado de ánimo, que según la Organización Muundial de la Salud afecta a más de 350 millones de personas en el mundo, inhabilita el normal funcionamiento de las personas por sentirse en tristeza constante, experimentar malestar psíquico y físico, frustración, falta de placer y falta de motivación. El origen de esta enfermedad es múltiple y se puede producir por factores biológicos, ambientales y genéticos. Típicamente esta condición se trata con una combinación de

fármacos y terapia psicológica. Se cree que el estrés que generan las exigencias de la vida moderna ha disparado el índice de personas afectadas, al exacerbar el éxito y la búsqueda de la felicidad permanente. La depresión, como todas las emociones y sentimientos, es una manifestación mental. Nuestro cerebro puede, por situaciones puntuales, o que se prolongan en el tiempo, establecer un patrón de sentimientos que pueden impulsar nuestras vidas, o trastocarlas con estados mentales debilitantes y paralizantes, como la depresión. Esta condición recibe hoy gran ayuda de la psiquiatría y la psicología, pero quizás también habría que ver cuáles son los roles y expectativas que nuestra sociedad tiene de nosotros y que podrían contribuir a fomentarla.

Neurociencia y cine: ¿cuánto de ciencia y cuánto de ficción?

La industria cinematográfica ha capitalizado la curiosidad por los procesos que surgen de nuestro cerebro a través de una serie de películas. Aquí me referiré a dos de ellas, para analizar qué tan cercanas se encuentran de los conocimientos neurocientíficos más recientes. En *The Matrix*, de las hermanas Lana y Lilly Wachowski, la Tierra está dominada por máquinas y los seres humanos son criados en una tina rellena de líquidos que mantienen el cuerpo, mientras sus cerebros están conectados a una serie de cables con los cuales es posible controlar sus mentes. El mundo «real», como cada uno de los personajes de la película lo experimenta, no es sino un mundo ficticio, provocado por la estimulación y registro de la actividad eléctrica de cada uno de los cerebros. El protagonista de la película escapa de esta prisión mental para combatir a las máquinas que controlan sus cuerpos y mentes. En el desarrollo de la historia, una parte importante de la acción pasa en el mundo virtual, donde los cerebros de diferentes personas se conectan a

esta simulación mental colectiva y experimentan todo de una forma que no distingue entre lo real y lo que fabrican en sus mentes las máquinas.

Pero ¿se podría crear una «realidad» a partir de la activación directa del cerebro?

Desde mediados del siglo pasado, neurólogos y neurocientíficos han explorado esta pregunta. Uno de los primeros en estudiar las consecuencias de la estimulación directa del cerebro con electricidad, fue el neurocirujano americanocanadiense Wilder Penfield, quien tenía un enorme interés en ayudar a personas afectadas de epilepsia, resolviendo el problema mediante la destrucción de las células nerviosas en la región del cerebro donde se originaban las convulsiones.[25] Antes de realizar estas lesiones, Penfield y su equipo, que incluía al doctor Herbert Jasper, estimulaban con un electrodo, que enviaba pequeños pulsos de corriente a partes del cerebro en pacientes que estaban despiertos. Los investigadores observaron que la estimulación directa del cerebro provocaba distintos efectos: movimiento de brazos y piernas, experiencias sensoriales y experiencias complejas, como la activación de memorias, ideas irreales, y la recolección de sueños, olores o alucinaciones auditivas y visuales, incluso experiencias tan inusuales como sensaciones de salirse del cuerpo o experiencias de *déjà vu*.

Estos estudios pioneros, y muchos otros que los siguieron, demostraron que es posible evocar experiencias reales a través de la estimulación directa del cerebro. Sin embargo, los estados mentales que se evocan son muy simples y aún hoy no podemos fabricar experiencias sensoriales, o de otro tipo, que se parezcan a la compleja realidad que experimentamos día a día. Esto ocurre porque aún no sabemos qué estructuras de la enorme y compleja red de neuronas podemos activar artificialmente para lograr estos estados mentales más complejos.

Otro elemento que aparece frecuentemente en *The Matrix* es que la estimulación directa del cerebro podría lograr que una persona fuera capaz de aprender, en unos pocos segundos, la habilidad de realizar actividades como pelear al estilo Kung Fu o aprender a manejar un helicóptero. Este aspecto de la película, sin embargo, no tiene sustento neurobiológico. Sabemos que el aprendizaje requiere modificaciones físicas del cerebro que en general tardan bastante tiempo, desde horas hasta días y semanas, y por lo tanto sería difícil lograr un aprendizaje instantáneo, en la medida que llevar a cabo estas tareas requiere de modificaciones físicas en el cerebro. Algo que sí sería posible es establecer una nueva memoria, o quizás una falsa memoria, activando directamente algunas neuronas, cuestión demostrada en experimentos recientes por Martín Ramírez, Xu Liu y sus colaboradores del MIT, quienes implantaron electrodos en el cerebro de una rata y activaron eléctricamente el cerebro de una manera parecida a como lo hacen otras ratas cuando tienen una conducta de miedo.[26] La rata estimulada con los electrodos mostró miedo instantáneo a un estímulo, aunque nunca lo había visto, es decir, reveló la creación artificial de un estado mental en un animal que nunca había tenido esa experiencia.

Es interesante que la estimulación eléctrica del cerebro sea algo común en la práctica clínica humana, ya que la activación artificial de grupo de neuronas se usa terapéuticamente en varias enfermedades neuropsiquiátricas, que incluyen la depresión, la enfermedad de Parkinson y distonía, entre otras. En estos casos, se trata más bien de activar o inhibir el cerebro en forma gruesa, por razones médicas. También la estimulación artificial ocurre hoy como un proceso para reemplazar órganos de los sentidos que están enfermos o ausentes. Quizás el caso más exitoso corresponde a los implantes en el oído, específicamente en la cóclea, los cuales se utilizan cuando las células receptoras del oído se han perdido. En

este caso, la función de estas células del oído es reemplazada por un micrófono y computador que luego estimula a través de pulsos eléctricos directamente el nervio que va desde el oído hacia el cerebro. Si bien esta activación eléctrica no es completamente fiel a lo que hace un oído normal, sí implica que las personas que reciben estos implantes aprendan con el tiempo a hacer una asociación adecuada entre la estimulación eléctrica y su percepción auditiva, logrando incluso hablar y conversar con otros, restaurando parte importante de su función auditiva.

Nuestros cerebros, a través de su actividad eléctrica, manejan los músculos, y a través de ellos el movimiento de manos o piernas, así como del resto del cuerpo. Sin embargo, cabe preguntarse qué pasa con la posibilidad de que nuestro cerebro pueda, a distancia, manejar o activar alguna máquina. En la película *Surrogates*, protagonizada por Bruce Willis y dirigida por Jonathan Mostow, se muestra un mundo futurista donde los seres humanos viven en forma aislada e interactúan socialmente a través de robots, una forma idealizada de sus dueños, que son manejados a través de una interfaz cerebro-máquina. De esta manera, los personajes de la película, a través de sus conexiones cerebrales, controlan los robots para que estos realicen las tareas o trabajos que tienen encargados. Cada persona puede mover su robot personal, así como escuchar, ver y en general sentir lo que le ocurre al robot a través de conexiones directas a su cerebro. En la película casi todas las personas tienen un «surrogado» con el que pueden vivir su vida sin riesgos de sufrir daño físico, además de presentarse a los demás con un cuerpo idealizado.

A pesar de que esto parece una realidad muy lejana, la neurociencia ha mostrado avances substanciales en la posibilidad de manejar máquinas y robots directamente con el cerebro. Desde hace más de diez años, científicos interesados en ayudar a personas con una parálisis completa de brazos o piernas han explorado la

posibilidad de medir la actividad cerebral de estos pacientes cuando desean mover brazos o piernas, y utilizar estas señales para poder mover brazos robóticos, sus propios brazos, o simplemente manejar directamente con sus cerebros cosas a su alrededor, como interruptores de luces o el cursor de un computador. De hecho, en Estados Unidos ya se han insertado en más de cuatro pacientes electrodos muy pequeños en la parte del cerebro que comandan movimientos de los brazos, y estas señales se han utilizado para mover brazos robóticos externos. Asimismo, estudios recientes han buscado una aproximación parecida, aunque con señales que pueden ser registradas desde afuera de la cabeza, para evitar la cirugía necesaria en el caso de la inserción de electrodos. Quizás muchos lectores podrán recordar que para la inauguración del mundial de fútbol de Brasil en 2014 se presentó un paciente con un exoesqueleto que era manejado directamente por sus señales cerebrales. En este caso, el manejo mental del robot le permitió al paciente patear ligeramente una pelota de fútbol. Aunque esto fue un pequeño paso, demuestra que la conexión directa entre el cerebro y máquinas ya es una realidad.

Si bien quedan enormes desafíos para transformar estos avances en algo común y eficiente, es posible pensar que, en el futuro, estas tecnologías permitirán que personas que hoy se encuentran privadas de movimiento puedan reconectar sus propios brazos o piernas, o mover brazos o piernas artificiales, en caso de que los hubieran perdido. También nos podemos imaginar que estos avances podrán usarse para manipular robots o maquinaria, en ambientes de alto riesgo para las personas, evitando así accidentes laborales de trágicas consecuencias.

Sobre la simultaneidad de las tareas cognitivas

Si el cerebro es el sistema más complejo del universo, parecería razonable pensar que este órgano debiera poder hacer muchísimas cosas a la vez. Este se ocupa de manera simultánea de muchísimos procesos, ya que debe contribuir a regular las funciones del cuerpo, mantener nuestro equilibrio y tono muscular, ayudar a movernos, mantener la capacidad de respuesta a estímulos, entre muchos otros procesos homeostáticos. Es por ello que podemos caminar y al mismo tiempo conversar, sin tener que preocuparnos de regular los latidos del corazón o la actividad de nuestros intestinos. Ahora, si esta pregunta se vuelve a plantear, pero lo que queremos saber es si acaso el cerebro puede simultáneamente realizar tareas cognitivas complejas, como escribir en un computador mientras leemos un libro, o atender una película mientras chateamos en nuestro teléfono celular, entonces la respuesta es negativa. Es altamente probable que estas tareas no las hagamos tan bien en comparación con la ejecución de cada una de esas tareas en forma única y secuencial.

Diversos estudios han mostrado que cuando nos enfrentamos a dos tareas complejas, el cerebro no las realiza en forma simultánea, sino que alterna rápidamente entre una y otra. Es importante destacar que cuando uno cambia de tareas, pierde cierto tiempo, puesto que el cerebro debe recuperar el contexto y las variables relevantes para ejecutar apropiadamente la otra tarea a realizar, cuestión que a todas luces resulta ineficiente, de manera que cuando nos ponemos hacer muchas cosas diferentes al mismo tiempo, gastamos un tiempo considerable llevando nuestro cerebro a reclutar los diferentes circuitos necesarios para cada una de las diferentes tareas.

En todo caso, estas observaciones se contraponen con nuestra frecuente sensación de poder realizar muchas cosas en forma simultánea, de lo cual incluso a veces nos vanagloriamos. Aquí vemos claramente una interesante disociación entre las mediciones

científicas y nuestra propia percepción de eficiencia. Otra demostración de que nuestro cerebro siempre justifica cada una de nuestras acciones.

Telepatía

La telepatía proviene de una raíz griega que significa «comunicación a distancia». ¿Qué puede decir la neurociencia moderna de la telepatía, es decir, de la habilidad de comunicarse a distancia sin que esto ocurra a través de nuestros sentidos? Daré una vuelta larga para responder esta pregunta porque es una buena oportunidad para aclarar cómo se establecen las verdades científicas. En neurociencia, así como en el resto de las ciencias, las verdades surgen o se establecen por un criterio de validación, que, en este caso, es el método científico. Bajo este método, una afirmación se convierte en verdad científica cuando se cumplen cuatro reglas. La primera establece que una persona debe explicar el fenómeno a observar, es decir, debe escribir una «receta» para que cualquier persona pueda observar el fenómeno que se desea entender. Si se tiene un reporte anecdótico o no se puede reproducir, un fenómeno pasa a ser excluido de cualquier explicación científica. Un segundo paso que deben cumplir las verdades científicas es proponer un mecanismo, es decir, una serie de relaciones entre elementos conocidos que puedan explicar cómo ocurre este fenómeno. Esto es lo que en general llamamos hipótesis. En tercer lugar, es importante establecer cuáles son las consecuencias que tiene este mecanismo. El último paso del método científico implica que los fenómenos predichos por la hipótesis se comprueben u observen. Al completarse este último paso, la explicación o hipótesis que hemos planteado es, científicamente, una verdad.

Dicho esto, el problema con la telepatía y otros fenómenos de la misma clase que conocemos como «paranormales», es que no han podido cumplir con ninguno de estos pasos. De hecho, ni siquiera han podido cumplir con el primero, que es mostrar una manera de reproducir la telepatía de una forma en que cualquier persona la pueda observar. Sin este paso, no es posible hacer exploraciones adicionales y, por lo tanto, estos fenómenos quedan sin explicación científica. En el fondo, a pesar de numerosos y repetidos intentos de encontrar evidencia científica para la telepatía, nadie ha podido mostrar esta actividad de forma sistemática y repetible. Por lo tanto, para la ciencia, el fenómeno de la telepatía y sus análogos no existen como hechos científicos.

Es importante hacer notar que, como decía un gran maestro y fisiólogo chileno, el doctor Mario Luxoro, las verdades científicas son verdades así, con «v» minúscula. De manera que lo que es verdad hoy, puede dejar de serlo en algún futuro cercano. Una de las fortalezas de la ciencia reside en que sus afirmaciones son validadas por la capacidad de repetir sistemáticamente los fenómenos y por lo tanto de ser explicadas y utilizadas por todos.

¿Por qué no me puedo hacer cosquillas?

Esta es una de las preguntas más antiguas sobre nuestra conducta, y ya Aristóteles la formulaba en el 325 a.C. Cada uno de nosotros esos lugares en el cuerpo en que, al ser estimulados con las cosquillas de otra persona, nos provocan risa, hasta el punto de que queremos arrancar. Sin embargo, cuando nosotros mismos usamos nuestras manos para activar la misma zona del cuerpo, nuestra reacción es de completa indiferencia. Se cree que la cosquilla es un mecanismo del cuerpo para responder a potenciales estímulos que causan insectos u otro animal potencialmente peligroso,

especialmente en lugares frágiles como nuestro abdomen u otras partes blandas. La explicación de por qué no podemos hacernos cosquillas a nosotros mismos reside en la moderna noción de que el cerebro es una máquina que pasa una buena parte del tiempo haciendo predicciones de lo que va a ocurrir en el mundo. Estos modelos mentales de la realidad son luego contrastados con lo que ocurre de verdad en la interacción con el medio. Cuando una persona inicia un movimiento, su cerebro tiene una gran habilidad de predecir las consecuencias de ese movimiento. De manera que, si uno trata de hacerse cosquillas, el resultado de esa estimulación de la piel es completamente predicha por el cerebro, y, por lo tanto, no genera ninguna sorpresa. La cosquilla, por lo tanto, requiere sorpresa de parte del cerebro.

Esta idea fue examinada por los investigadores de la University College London, Sarah Blakemore, Daniel Wolpert y Chris Frith,[27] científicos que fabricaron un robot que hacía cosquillas. En este estudio, una mano robótica que estimulaba la piel de un voluntario, seguía en forma idéntica y precisa los movimientos de la mano de esa persona, y en esta circunstancia, los sujetos no reportaban una reacción o no respondían con ningún sentimiento de cosquillas. Sin embargo, los investigadores podían introducir pequeños retardos de tiempo entre los movimientos de la mano del sujeto y los movimientos del robot, de manera que los movimientos ejecutados por la mano robótica eran cada vez menos predecibles por el sujeto. Los científicos encontraron que, a medida que los movimientos de la mano eran menos precisos con respecto a lo que hacía el sujeto, más sensación de cosquillas les producía. Por tanto, no era necesariamente el movimiento en sí, sino la sorpresa de ese movimiento lo que causaba cosquillas.

Este grupo de científicos reveló un aspecto fundamental con el cual opera nuestro cerebro: a través de una permanente predicción sobre los cambios del medioambiente, se vuelve más eficiente y

aumenta su habilidad para mantener la integridad del cuerpo que lo alberga.

¿Cómo tomamos decisiones?

Todos los días tomamos decisiones. ¿A qué hora me voy a levantar? ¿Qué voy a tomar para el desayuno? ¿Qué ropa me voy a comprar? Otras decisiones pueden ser más relevantes: ¿Qué tipo de trabajo voy a buscar? ¿Saldré o no a tomar un café con esa persona? ¿Por quién voy a votar? ¿Qué préstamo solicitar en el banco para mi casa? Las decisiones son un aspecto relevante en nuestras vidas y tienen consecuencias que se pueden arrastrar durante mucho tiempo. En términos biológicos, la posibilidad de tomar decisiones surge del hecho de que, en tanto organismos, a cada momento podemos desplegar un amplio espectro de conductas posibles, es decir, en un instante dado, el curso de nuestras acciones y experiencias ofrece varios rumbos alternativos.

Es cierto que algunas de nuestras conductas son estereotipadas, como lo son algunos reflejos. Frente a una llama ardiente, es casi imposible no retirar la mano, no podemos impedir que nuestra pupila cambie de tamaño cuando aumenta súbitamente la luz de la habitación en que nos encontramos ni podemos evitar que se nos haga agua la boca cuando tenemos hambre y nos presentan un alimento apetitoso. Al mismo tiempo, la mayor parte de nuestras conductas voluntarias y sobre la cuales tenemos la sensación de libertad de acción pueden ser vistas como una elección entre muchas alternativas posibles.

Es justamente la complejidad de nuestro cerebro lo que permite esta amplia gama de conductas y por ello, mientras más complejo es un cerebro, más son las alternativas de conductas posibles y también es mayor la necesidad de un proceso mental en la toma de

decisiones. Una hormiga o una lagartija, con sus cerebros menos complejos, tendrán menos oportunidades de tomar decisiones, dado que sus cerebros ofrecen menos posibilidades de alternativas a conductas estereotipadas. De allí que la conducta de un insecto sea más predecible que la de un reptil y que esta sea mucho más predecible que la conducta humana.

Considerando entonces que en cada momento hay una gama posible de conductas alternativas, ¿cómo se escoge cuál de ellas iniciar? Nuestro cerebro debe realizar un proceso mental para considerar las distintas alternativas y evaluar las consecuencias de tomar uno u otro curso de acción. Este proceso mental es lo que en neurociencia se define como el proceso de la toma de decisiones. El doctor Rubén Moreno-Bote, científico de la Universidad Pompeu Fabra de Barcelona, explica en su libro *¿Cómo tomamos decisiones*? qué ocurre en el cerebro con las neuronas involucradas en estas conductas. Moreno-Bote indica que el cerebro debe ensayar o simular las diferentes situaciones que representan las diferentes decisiones a tomar. Nuestra actividad mental durante una toma de decisiones, entonces, es una actividad de evaluación futura de las consecuencias de cada una de las acciones posibles. La decisión final estará relacionada con aquella opción que resulta en una actividad mental más intensa. La actividad neuronal asociada a las distintas alternativas «compiten» entre ellas, y cuando un grupo de neuronas que representa la decisión alcanza cierto mínimo nivel de activación, la red neuronal inicia la conducta asociada a ese grupo de neuronas. Cada una de las simulaciones mentales, que se corresponde con las distintas alternativas, debe recoger la información correspondiente con las consecuencias de cada una de estas decisiones y esta evaluación se traduce en actividad eléctrica de distintas partes del cerebro. Esto implica que, cuando estamos tomando decisiones, y estas son particularmente difíciles, nuestro cerebro necesita más tiempo para evaluar. Por lo tanto, nuestra

mente se encuentra menos disponible para interaccionar con el mundo. Quizás es por eso que nuestros procesos reflexivos van acompañados de un aparente retraimiento del mundo, y damos también una apariencia de estar distraídos, mirando al techo o cerrando los ojos.

¿Qué es la consciencia?

La consciencia es quizás una de las conductas más difíciles de entender porque es uno de esos fenómenos que ni siquiera estamos de acuerdo en cómo definir. Si uno lee un diccionario, allí encontrará que la palabra consciencia proviene del latín y significa «conocimiento compartido» o «con conocimiento». Aquí distinguimos consciencia (con «s») como algo diferente de la conciencia del sentido moral, que se entiende como capacidad de distinguir entre el bien y el mal. La Real Academia Española define la consciencia como el «conocimiento inmediato o espontáneo que el sujeto tiene de sí mismo, de sus actos y reflexiones». En psiquiatría, la consciencia se puede también definir como el estado cognitivo no abstracto que permite la interacción, interpretación y asociación con los estímulos externos, denominados realidad. En otras palabras, la consciencia requiere del uso de los sentidos como medio de conectividad entre los estímulos externos y sus asociaciones. Cualquiera que sea la definición de consciencia en distintos ámbitos del quehacer humano, en casi todos los casos las definiciones se refieren a este fenómeno como una experiencia propia del ser humano o de un animal. En este sentido la consciencia es una *experiencia subjetiva* como lo es el dolor, el ver, escuchar o sentir una emoción. Para la neurociencia esta conducta es el resultado del funcionamiento del cerebro, de la misma manera como el cerebro es el responsable de ver, escuchar, sentir dolor o

tener una emoción. Esta disciplina, por tanto, considera la premisa de que no existe el dualismo, es decir, se concibe que la consciencia es un proceso físico y que este ocurre en el cerebro.

Pero ¿qué propone la neurociencia sobre la consciencia? Si uno examina la literatura sobre el tema, existen varias posturas respecto a este fenómeno. Por un lado, hay investigadores que piensan que la neurociencia no puede explicar la consciencia, porque es un problema demasiado complejo, y de alguna manera el cerebro no puede completamente explicarse a sí mismo. Esta disciplina ha tomado, por tanto, varias aproximaciones para entender este problema. Cuando alguien se golpea la cabeza, o cuando se encuentra bajo anestesia, o cuando se duerme, se observa una conducta que reconocemos como inconsciencia. Estas situaciones nos permiten entender qué es lo que ocurre en el cerebro durante estas conductas. Estudios realizados en pacientes mientras están inconscientes por anestesia, demuestran que la corteza cerebral está involucrada de manera muy importante en poder generar la consciencia. Siendo los humanos los animales con la mayor cantidad comparativa de corteza, quizás somos los animales con la consciencia más compleja. Por otro lado, hay que hacer notar que la ausencia de corteza en algunos animales no necesariamente implica falta de consciencia, por lo que podemos inferir que los otros animales, además de los humanos, podrían, en principio, experimentar también estados de consciencia. Este hecho ha llevado a grupos de neurocientíficos a declarar que el ser humano no es el único animal capaz de tener consciencia. En 2012, se realizó en Inglaterra una conferencia sobre consciencia que buscaba honrar al descubridor de la estructura del ADN y ganador de un Premio Nobel, Francis Crick. Ahí se presentó la Declaración de Cambridge sobre la Consciencia,[28] donde se sostuvo lo siguiente:

> Decidimos llegar a un consenso y hacer una declaración para el público que no es

científico. Es obvio, para todos en este salón, que los animales tienen consciencia, pero no es obvio para el resto del mundo. No es obvio para el resto del mundo occidental ni el lejano Oriente. No es algo obvio para la sociedad.

De manera consecuente, el grueso de la evidencia indica que los humanos no somos los únicos en poseer la base neurológica que da lugar a la consciencia. Los animales no humanos, incluyendo a los mamíferos y pájaros, y otras muchas criaturas, como los pulpos, también poseen estos sustratos neurológicos.

Una de las características que sin duda nos diferencia de otros animales es la complejidad de nuestro lenguaje. A través de él podemos relatar nuestra experiencia, por lo que la consciencia también se puede estudiar a través de esta facultad. Una aproximación que va en esta línea, que tiene como propósito entender el proceso de la consciencia, se conoce como *qualia*, y explota la capacidad de los seres humanos para poder compartir su experiencia subjetiva. A través del lenguaje, puedo relatar si veo o no veo algo, cuál es el color de algo o cuál es la emoción que siento. Esto permite examinar la actividad del cerebro luego de experimentar los fenómenos y relatarlos a otros. Es posible asimismo que el propio lenguaje permita enriquecer nuestras experiencias subjetivas y otorgue así un mayor desarrollo de la consciencia.

Existen variadas propuestas de explicaciones neurobiológicas de la consciencia, aunque no hay acuerdo en la comunidad. Esto ocurre porque la complejidad de esta conducta es grande y, hasta ahora, tenemos muy poca evidencia experimental para las distintas ideas. Eso sí, esto no ha sido freno para que la neurociencia haga toda clase de propuestas teóricas. Una propuesta bastante extendida es la Teoría del Espacio de Trabajo Global (GWT, por sus siglas en inglés) sugerida por Bernard Baars en 1983. El término «espacio de trabajo global» se refiere a una memoria transitoria (parecida a la RAM de los computadores) que sería una instancia

donde la actividad de diferentes partes del cerebro converge para un uso temporal. Esta actividad distribuida en regiones del cerebro es la que daría origen a lo experimentamos como la consciencia. Otra de las propuestas más extendidas es la Teoría de la Información Integrada, presentada por Gulio Tonini en 2004. Esta propone una serie de axiomas, o «verdades evidentes», sobre la experiencia de la consciencia y luego realiza una serie de postulados sobre su sustrato físico. Es decir, esta teoría, aunque no indica cómo surge la consciencia, sí define cuáles serían las características y límites de los sistemas físicos que podrían tenerla.

Si la consciencia se encuentra presente en diversos animales, quizás sea posible inferir la existencia de un rol biológico importante que se ha mantenido a través de la evolución, desarrollándose junto con el cerebro. Junto al doctor Moreno-Bote trabajamos actualmente en una propuesta para asignarle un rol biológico a la consciencia. Esta propuesta tiene que ver con el hecho de que en la medida que los cerebros se hacen más complejos, la gama posible de conductas en un animal aumenta. Mientras más complejo el cerebro de un animal, este se ve enfrentado a la necesidad de tomar decisiones, escogiendo entre todas las conductas posibles a realizar en un momento dado. Como mencioné en una sección anterior, este proceso requiere simular mentalmente los distintos escenarios y consecuencias de los diferentes cursos de acción. Por tanto, al ser más grande y complejo nuestro cerebro, estas simulaciones mentales son más sofisticadas. En consecuencia, estas simulaciones mentales pueden ser tan precisas y complejas que, en principio, debiera existir un mecanismo biológico para distinguirlas del proceso mental relacionado con nuestra experiencia inmediata y contingente, y que ocurre en interacción con el medio ambiente.

En otras palabras, la consciencia podría ser el proceso biológico que monitoriza nuestras simulaciones e imaginaciones y las

distingue como algo diferente de la realidad que vivimos cuando interactuamos con el mundo físico. Bajo esta mirada, sería entonces la experiencia subjetiva del funcionamiento del mecanismo biológico que distingue la experiencia de la realidad, de aquellas experiencias subjetivas que surgen de nuestras imaginaciones y simulaciones mentales. Sin consciencia, no podríamos distinguir entre alucinaciones, imaginaciones, sueños o realidad. Quedan todavía muchos estudios y discusiones para verificar si esta idea tiene sustento en la evidencia experimental, pero el problema de entender la consciencia tiene implicancias que van más allá del ser humano y de los otros animales. ¿Qué tan complejo debe ser el cerebro de un animal para tener también consciencia? Si máquinas inteligentes pueden replicar lo que hacemos los humanos, ¿tendrán también consciencia? Si efectivamente estas máquinas tienen consciencia, ¿qué tipo de relación debiéramos tener con ellas?

Quizás el problema de la consciencia sea el más difícil de entender, pero es también el que últimamente nos definirá como humanos y definirá el futuro de nuestra relación con los otros animales y con la inteligencia artificial.

NEUROCIENCIA Y SALUD

¿Qué efecto tiene el alcohol sobre el cerebro?

Las drogas y bebidas alcohólicas son un tema común en nuestra sociedad, a pesar de que poco se conoce sobre las consecuencias de su uso para la actividad cerebral, y es que estas sustancias son una espada de doble filo. Pueden traer muchos beneficios, como es el caso de fármacos utilizados para mitigar deficiencias o trastornos neuropsiquiátricos, o causar estragos cuando las usamos ignorando sus efectos. En general, podemos decir que las drogas son sustancias capaces de imitar la acción de un químico natural utilizado por el cerebro o de alterar la liberación de estos químicos. Revisemos algunas de las drogas que más frecuentemente se consumen, empezando con el alcohol.

Contrariamente a la creencia común, el consumo de alcohol en dosis moderadas no mata las neuronas del cerebro. El alcohol es una sustancia presente en la naturaleza y cuando se consume tiene, entre otros efectos, el de unirse a una proteína receptora presente en algunas neuronas y cambiar sus propiedades. Esta proteína, conocida como «receptor de GABA», está presente en cierto tipo de neuronas, y cuando estas proteínas unen moléculas de GABA, se observa una inhibición o disminución de la actividad eléctrica de esas neuronas. El alcohol puede unirse a esta misma proteína y cuando eso ocurre aumenta la acción inhibitoria de esta sustancia. En otras palabras, el alcohol tiende a inhibir la actividad del cerebro. Cuando hay un consumo ligero de alcohol, hay entonces una reducción ligera de la actividad cerebral, que ocurre en todos los sistemas cerebrales y que se manifiesta como una relajación general y como una reducción de las inhibiciones durante la que las personas pueden experimentar sensaciones aumentadas de sociabilidad o euforia, al mismo tiempo que reduce nuestra

habilidad de percibir, movernos y pensar. Por supuesto, todos estos efectos dependen del monto de alcohol consumido. Cuando la ingesta de esta sustancia aumenta, la inhibición también lo hace proporcionalmente, teniendo como consecuencia la inhabilidad del cerebro de operar apropiadamente. El consumo de grandes cantidades de alcohol va progresivamente disminuyendo la capacidad del cerebro de generar conductas adecuadas y, en casos extremos, conduce a un coma etílico donde se puede incluso perder la consciencia, con el riesgo de depresión de los centros respiratorios y, por ende, de muerte por asfixia. El coma puede ocurrir cuando el porcentaje de alcohol en la sangre supera los 3 gramos por litro. En Chile, el límite legal para conducir son 0,8 gramos de alcohol por litro.

Por otro lado, el consumo sistemático y frecuente de grandes cantidades de alcohol tiene consecuencias graves para la salud humana. El Servicio Nacional para la Prevención y Rehabilitación del Consumo de Drogas y Alcohol (Senda) estima que, en Chile, la dependencia de alcohol es la primera causa de la pérdida de años de vida saludables (Avisa), superando a la obesidad y a otros factores de riesgo. Además, en un estudio reciente realizado por la Universidad Católica de Chile en colaboración con la Organización Mundial de la Salud y otras instituciones de Estados Unidos y Canadá, se constató que, en 2014, treinta y seis personas fallecieron diariamente por causas relacionadas al consumo abusivo de alcohol en el país. Esta cifra alcanza un 13 por ciento de las muertes registradas ese año, en comparación con el 10 por ciento de las muertes relacionadas al alcohol registradas una década antes. Otros datos de Senda[29] indican que los chilenos bebemos 55 gramos de alcohol puro por día de consumo, cuando por sobre veinte gramos se considera riesgoso. Esos altos consumos, además de las consecuencias sociales y emocionales, dañan directamente al cerebro, destruyendo neuronas y disminuyendo nuestra habilidad

de pensar, especialmente nuestra habilidad de formar nuevas memorias.

¿Y CUÁL ES EL EFECTO QUE TIENE LA COCAÍNA EN EL CEREBRO?

Para entender mejor cómo afecta la cocaína al funcionamiento del cerebro debemos entender primero algunos procesos de modulación de la actividad cerebral, particularmente en algunos circuitos importantes para mantener nuestro cuerpo balanceado. Uno de estos se conoce como «circuito de recompensa». Muchas de nuestras conductas se inician por una necesidad homeostática o por mantener satisfechas las necesidades vitales del cuerpo. Por ejemplo, cuando nos da hambre, iniciamos una conducta de búsqueda de alimento. Esta búsqueda va acompañada de sensaciones fuertes que nos motivan a buscar alimento. Una vez que lo encontramos y consumimos, el cerebro debe detener esta conducta de búsqueda. Algo similar ocurre cuando logramos satisfacer otras necesidades del cuerpo, con agua, abrigo o sexo. Esta sensación de placer es el resultado de la activación del circuito de recompensa. El circuito cerebral usa como neurotransmisor, es decir, como mediador químico entre las neuronas de ese circuito, una molécula llamada «dopamina». Esta se libera de manera significativa en este circuito durante su activación, pero luego es recapturada por las neuronas, de lo cual resulta el cese de la sensación de placer. De manera consecuente, esta sensación de placer asociada a estas conductas de búsqueda es de corta duración. La cocaína, cuando es consumida, llega a todo el cerebro, y también a las neuronas de este circuito, impidiendo que la dopamina sea recapturada. Como resultado, el consumo de cocaína produce placer, euforia, ausencia de cansancio, de hambre o de sueño. El lado oscuro del consumo de esta droga tiene que ver, por

un lado, con que muchas otras partes del cerebro utilizan dopamina para funcionar adecuadamente, como los sistemas motores o los circuitos de la memoria, que se ven negativamente afectados por el consumo. Por otro lado, y más importante aún, el circuito de la recompensa busca ajustar su balance fisiológico cuando se consume cocaína, reduciendo la propia síntesis de dopamina. Esta situación lleva a estados de deprivación, acompañados de sus estados psicológicos negativos, que van desde la dificultad de concentrarse, la inhabilidad de experimentar placer, hasta la depresión y la ansiedad. Esto explica el alto riesgo de adicción asociado al consumo de esta droga.

Nuestro cerebro es el resultado de un proceso evolutivo donde gran parte de su funcionamiento se basa en sustancias químicas. Estas se encuentran además en muchas otras plantas y animales y por lo tanto siempre estaremos expuestos a que lo que comemos y consumimos puedan afectar nuestra actividad cerebral. Conocer el efecto e impacto de diferentes sustancias puede ser tremendamente beneficioso para mantener la salud y balance de nuestro cerebro. Al mismo tiempo, las sustancias químicas que usamos y de las que abusamos pueden alterar este frágil equilibrio y modificar toda nuestra actividad mental, desde cómo nos sentimos hasta lo que percibimos o hacemos.

¿Se puede trasplantar la cabeza de una persona al cuerpo de otra?

En la actualidad, la investigación científica realizada en medicina ha permitido que órganos y partes del cuerpo que han fallado o muerto sean reemplazadas por las mismas partes de un donante. Hoy es común escuchar hablar de trasplantes de corazón, hígado, pulmón o incluso, recientemente, de trasplantes de cara. Pero ¿se puede trasplantar la cabeza? Quizás inicialmente habría que

preguntarse por qué hacer un trasplante de cabeza. La respuesta médica tiene que ver con la existencia de pacientes cuyas enfermedades resultan en una muerte inminente del cuerpo y que en principio podrían sobrevivir si sus cabezas son trasladadas a otro cuerpo, que le permitiría sustentar la vida. Esta idea ha sido extremadamente controversial, especialmente en el último año, debido a que un cirujano italiano, el doctor Sergio Canavero, tiene programado realizar una de estas cirugías en China. El médico ya cuenta con un voluntario para la operación.[30] Si bien parte del interés del doctor Canavero es buscar un camino a la inmortalidad del cuerpo, la comunidad médica siente que hay todavía muchas incógnitas respecto a sus consecuencias tanto fisiológicas como psicológicas. Por un lado, el desafío de prevenir que el cerebro se quede sin sangre por un período prolongado de tiempo y que por lo tanto sufra de daño irreversible es algo quirúrgicamente solucionable. Sin embargo, existe mucho desconocimiento sobre lo que ocurrirá con esa cabeza y cerebro que ahora recibiría sangre y químicos de un cuerpo que no necesariamente es compatible en su totalidad. Además, hay que considerar que, en el caso de que los trasplantes de cabezas sean inicialmente exitosos, el conocimiento para reconectar los nervios que tendrían que ser cercenados por la operación aún no existe, por lo que un trasplante de esta naturaleza permitiría al cerebro vivir, pero su cuerpo no podría ser manipulado por la persona que lo recibe, y esta no podría mover manos o piernas. Hoy en día, un paciente así estará condenado a una parálisis permanente. Esta controversia ilustra muy bien los dilemas y conflictos que se dan en la frontera de la ciencia biomédica, donde se deben conciliar los avances tecnológicos con aspectos éticos y psicológicos. ¿Quién será una persona que trasplanta su cerebro al cuerpo de otra? ¿La persona del cerebro o la persona del cuerpo? ¿Debemos prolongar la vida de un cerebro eternamente, trasplantándolo de un cuerpo a otro? ¿Estamos

seguro de que un cerebro nos puede revivir, luego de algunos minutos de declarar la muerte por inactividad del cerebro? Experimentos recientes realizados en cerdos de matadero han constatado que, horas luego de su muerte, algunas actividades de las células cerebrales se pueden recuperar de forma parcial. ¿Qué pasaría con la donación de órganos en este caso? Antes de que la tecnología avance hasta este punto, parecería conveniente discutir, como sociedad, estos aspectos para acordar cursos previos de acción.

Mente sana en cuerpo sano

A pesar de la enorme importancia que tiene nuestro cerebro en planear y ejecutar cada una de las conductas que nos mantienen vivos, también juega un papel fundamental en la tarea de mantener el resto de nuestro cuerpo sano. Al mismo tiempo, es bastante más frágil que otros órganos de nuestro cuerpo. Es el primero que sufre por la falta de oxígeno o que se deteriora por una alimentación inadecuada. Es más susceptible a traumas y es el más afectado por el consumo de drogas, incluyendo el alcohol.

Existen varias conductas que podemos incorporar para disminuir las probabilidades de que nuestro cerebro sufra algún deterioro. Muchas de estas son actividades que traen beneficios al cuerpo en su totalidad, pero son especialmente importantes para mantener una adecuada actividad cerebral. Por supuesto, es siempre conveniente considerar el practicar conductas saludables como, por ejemplo, mantener una buena alimentación.

El cerebro y el resto de nuestro cuerpo necesitan de varios nutrientes que se encuentran mayoritariamente presentes en una dieta de estilo mediterráneo, que incluye muchas verduras, frutas, pescado, semillas, proteínas vegetales y aceites no saturados como

el aceite de oliva. Estos alimentos mantienen un nivel de colesterol controlado y son importantes debido a que reducen la probabilidad de que el cerebro se quede sin flujo sanguíneo. Curiosamente, el cerebro está compuesto en gran parte de colesterol, que forma parte de las membranas de las neuronas y de las otras células que ayudan en la función cerebral. Por esto, no se puede prescindir completamente de este importante químico en una dieta. Más aun, una dieta especialmente baja en grasa y colesterol obligará al cerebro a canibalizarse, utilizando como último recurso energético la grasa que lo compone.

También es importante un adecuado control de la presión sanguínea, ya que reduce la posibilidad de derrames cerebrales. Por último, el control del azúcar es también un factor general de protección para el cuerpo y en especial para el cerebro, porque reduce el riesgo de diabetes, que a su vez es un factor de alto riesgo para la demencia cerebral.

Una segunda línea de cuidado tiene que ver con la protección física de nuestro cerebro. Golpes que lo dañan se asocian en general con una alta incidencia posterior de enfermedades neurodegenerativas como la enfermedad de Alzheimer o Parkinson, particularmente en la tercera edad. Incluso adultos jóvenes que sufren una lesión en la cabeza moderada o grave tienen más del doble de riesgo de ser afectados por el Alzheimer, según un importante estudio liderado por la doctora Brenda Plassman de la Universidad de Duke.[31] Es importante, como vemos, proteger siempre nuestra cabeza.

Asociado a nuestros cuidados físicos, es muy relevante destacar el ejercicio como una de las actividades que mayor protección proveen a nuestro cerebro. El ejercicio aumenta la oxigenación de la sangre y promueve las conexiones entre las neuronas que, como he afirmado anteriormente, son relevantes para el aprendizaje y la memoria. También mejora la actividad cognitiva en general y

nuestro desempeño. Asimismo, el ejercicio disminuye la presión arterial, mejora los niveles de colesterol y el balance del azúcar. Durante el ejercicio, el cerebro libera varios químicos, entre ellos las llamadas endorfinas, que tienden a reducir nuestra percepción del dolor y nos hacen sentir emociones positivas. ¿Cuánto ejercicio habría que hacer para obtener estos beneficios? En un estudio publicado por la doctora Joyce Gomes-Osman y colaboradores de la Universidad de Miami, se analizaron cerca de un centenar de casos que relacionaban el ejercicio con más de 122 pruebas diferentes de la función cerebral y que incluían una base de datos de más de 11 mil personas mayores.[32] Los autores encontraron que las personas que hacían ejercicio durante una hora, tres veces a la semana, a lo largo de un período de seis meses, mostraban las mayores mejoras en varias pruebas de pensamiento y velocidad. Este efecto se observó tanto en personas sanas como en personas con deterioro cognitivo leve o demencia.

Por último, he mencionado en otros capítulos que el cerebro es como un músculo: hay que ejercitarlo y alimentarlo bien para mantenerlo en forma. Para conservar entonces nuestras capacidades mentales tenemos que realizar toda clase de desafíos mentales, que pueden ir desde operaciones matemáticas hasta ejercicios de memoria, lectura o ajedrez. Estas actividades son buenos ejemplos para mantener fuertes nuestras conexiones entre las neuronas del cerebro y, por tanto, nuestras capacidades mentales. Las conexiones entre las neuronas o sinapsis son la base del mecanismo que permite estas conductas y requieren una permanente utilización para evitar su pérdida.

Algunas formas de perder peso

He mencionado que el cerebro ocupa entre un 20 y un 25 por

ciento de toda la energía que produce el cuerpo. Parece razonable inferir, por tanto, que si uso mucho mi cerebro, especialmente en actividades mentales intensas como jugar ajedrez o resolver un problema, ocuparé más energía y por lo tanto podré reducir mi peso. Esta es una idea interesante y atractiva pero lamentablemente no hay evidencia que la sustente. Sin embargo, sí se puede perder peso... solamente pensando en perder peso.

En un estudio que realizaron Alia Crum y Ellen Langer[33] de la Universidad de Harvard, se evaluó si la relación entre el ejercicio y la salud está mediada por cierto estado mental. Las investigadoras entrevistaron a más de ochenta camareras de habitación que trabajaban en siete hoteles diferentes. Las trabajadoras manifestaron que sentían que realizaban poco o ningún ejercicio diario aun cuando en sus trabajos estas corrían diariamente por los hoteles donde trabajaban. Las científicas informaron a la mitad de las camareras que, debido a su trabajo, ya estaban cumpliendo o superando las recomendaciones de treinta minutos de ejercicio diario. Un mes después de esta primera entrevista, las mujeres que fueron informadas creían que estaban haciendo más ejercicio que nunca y todas ellas mostraron una disminución en el peso, la presión arterial, la grasa corporal, la relación cintura-cadera y el índice de masa corporal, e incluso desarrollaron una presión arterial más baja a pesar de que en realidad no hacían más ejercicio que antes. La otra mitad de trabajadoras que no fueron informadas que estaban cumpliendo o superando las recomendaciones de ejercicio diario no mostraron cambios significativos. Estos resultados sugieren que, si uno cree que está haciendo suficiente ejercicio, sí puede perder peso. Se piensa que esto ocurre a través del efecto placebo.

¿Qué es el efecto placebo?

Nuestra actividad mental organiza nuestra conducta, controla nuestro cuerpo y modifica su fisiología. Por lo tanto, nuestras convicciones y creencias —que son actividades mentales— pueden influir de manera poderosa sobre el resto del cuerpo, tanto en forma positiva como negativa. La palabra placebo proviene del latín y significa «dar placer». El efecto placebo es la consecuencia positiva de una manipulación terapéutica o un fármaco que está desprovista de todo efecto fisiológico conocido. En medicina, este efecto es considerado en muchos estudios, para contrastar el efecto esperado de una sustancia o intervención terapéutica, cuyo mecanismo sí se conoce. Es una especie de control para asegurarse que el tratamiento o fármaco estudiado efectivamente produce un efecto fisiológico medible.

El primero en reconocer y demostrar el efecto placebo fue el médico inglés John Haygarth en 1799. En esa época eran populares y se vendían (a un alto precio) unos punteros metálicos, los cuales supuestamente eran capaces de «extraer» las enfermedades. Haygarth se dispuso a demostrar que el alto costo era innecesario comparando los resultados de los punteros de metal con unos de madera que imitaban los de metal. Los punteros de madera eran tan útiles (o inútiles) como los otros, mostrando, según Haygarth, «hasta un grado que nunca se ha sospechado, qué poderosa influencia sobre las enfermedades es producida por la mera imaginación».

El efecto placebo no es solo un pensamiento positivo. Requiere el convencimiento que un tratamiento o procedimiento funcionará. La mayoría de las veces, el efecto placebo se ha observado en la percepción del dolor. De hecho, estudios recientes en humanos han mostrado que, durante el efecto placebo de disminución de dolor, las mismas áreas del cerebro se activan cuando se contrasta el placebo con fármacos probados que disminuyen la percepción de dolor. Un clásico estudio de placebo fue dirigido por el doctor Ted

Kaptchuk de la Universidad de Harvard.[34] Este equipo de investigadores probó cómo reaccionaba la gente a los medicamentos para el dolor de migraña. Un grupo tomó un medicamento contra la migraña etiquetado con el nombre del medicamento, otro tomó un placebo, es decir una sustancia inocua, y un tercer grupo no tomó nada. Los investigadores descubrieron que el placebo era un 50 por ciento tan efectivo como el medicamento real para reducir el dolor después de un ataque de migraña.

Los placebos, sin embargo, son limitados. No curan una apendicitis ni componen un hueso roto. Aún no se comprende bien cómo funcionan, pero estos implican una reacción neurobiológica compleja que incluye desde aumento en los neurotransmisores que producen sensaciones agradables como las endorfinas y la dopamina, hasta una mayor actividad en ciertas regiones del cerebro relacionadas con estados de ánimo, reacciones emocionales y autoconsciencia. El efecto placebo se puede obtener no sólo por la ingesta de sustancia o fármacos, sino que puede ocurrir también por factores sociales, como ser atendido en forma cordial, o el uso de una bata blanca por el profesional de la salud.

Es interesante también destacar que la creencia o convicción de que un tratamiento o sustancia producirá efecto positivo puede ocurrir también a la inversa, es decir, el convencimiento de que una sustancia o tratamiento producirá un efecto adverso a la salud puede resultar en una consecuencia negativa para la salud de las personas. Este fenómeno recibe el nombre de «nocebo». Se ha mostrado en estudios clínicos de diferentes fármacos que algunas personas que están probando estos medicamentos y son informadas de potenciales efectos secundarios, terminan mostrando estos efectos, aun cuando el fármaco que se les entregó de prueba no contenía ningún químico.

El efecto placebo es muy potente, y puede hacer parecer que

intervenciones terapéuticas que no han sido probadas por la medicina parezcan efectivas. Estudios científicos bien conducidos pueden establecer estas diferencias entre placebos y efectos reales y, por tanto, sistematizar sus beneficios.

Deterioro cognitivo

Diversas culturas humanas representan a los ancianos como personas con un importante deterioro físico, las cuales, sin embrago, son al mismo tiempo poseedores de una gran sabiduría. ¿Qué ocurre en el cerebro de personas mayores y cómo afecta esto a los procesos cognitivos o mentales? Nuestro cerebro cambia durante toda nuestra vida, y durante ese tiempo, va perdiendo neuronas. Las personas que llegan a los 80 años probablemente han perdido casi un décimo de todas las neuronas de su cerebro y claramente uno esperaría que esto resulte en deterioro de sus capacidades cognitivas que acompañan el deterioro que ocurre en el resto de su cuerpo. Sin embargo, este cambio físico y la muerte progresiva de neuronas no necesariamente implica deficiencias cognitivas en todas las dimensiones. Si bien el deterioro cognitivo es una característica muy común en personas de edad avanzada hay también muchas personas que luego de los 80 pueden mantener habilidades cognitivas tan buenas como personas de mediana edad, particularmente en la memoria. Un estudio reciente realizado por Joshua Hartshorne y Laura Germine de la Universidad de Harvard mostró que el máximo rendimiento de diferentes aspectos cognitivos es altamente variable a través de la vida de los individuos.[35] Algunas capacidades cognitivas como la habilidad de reconocer rostros de personas, o la capacidad de reproducir listas de palabras o de ubicarse en la calle eran actividades que realizan mejor personas durante la adultez antes de

los treinta años, superando a los adolescentes. Sorprendentemente, otras actividades como las habilidades aritméticas, la comprensión del lenguaje, la riqueza del vocabulario o el manejo de información eran mucho mejor realizadas por personas de alrededor de los cincuenta años. Mantener la atención por ratos largos se logra mejor entre los 30 y 40 años. Otro estudio mostró que los jóvenes realizaban las tareas matemáticas con mucha mayor rapidez que personas de edad más avanzada, pero el número de errores de los jóvenes era mayor que las equivocaciones de estas últimas. Asimismo, el rendimiento en tareas de la toma de decisiones también es mejor en personas de mayor edad. Hallazgos similares encontró uno de los estudios más largos y extensos realizados en personas que envejecen. Esta investigación,[36] que inicio el Dr. K. Warner Schaie, ha rastreado la destreza mental durante más de cuarenta años en más de seis mil personas. El estudio arrojó que, en promedio, los participantes obtuvieron mejores resultados en las pruebas cognitivas cuando tenían una mediana edad que cuando eran adultos tempranos. Desde los cuarenta hasta los sesenta años, las personas obtuvieron mejores resultados en las pruebas de vocabulario, habilidades de orientación espacial (imaginando cómo sería un objeto si se rotara 180 grados) y de razonamiento inductivo, que cuando tenían veinte años. Por lo tanto, efectivamente hay evidencia de que nuestras habilidades mentales no se deterioran todas iguales a medida que envejecemos. Algunas de estas habilidades se mantienen e incluso mejoran con la edad, particularmente algunas capacidades verbales, y también el rendimiento en algunas tareas matemáticas sencillas.

AGRADECIMIENTOS

Este libro es, como mi actividad científica, un proyecto que he desarrollado con el aporte de muchas personas. Debo empezar agradeciendo a Agustín Iriarte, quien fue quizás la primera persona que me instó a escribir este libro. También agradezco a Andrés Couve, exdirector de nuestro Instituto de Neurociencias Biomédicas, por insistir en la escritura y producción de este libro. Llevar a cabo este proyecto fue posible, además, gracias a la invitación de varias escuelas y otras instituciones en las que impartí charlas y donde compartí mi entusiasmo por el conocimiento del cerebro humano; fue en estas instancias donde surgieron muchas de las preguntas discutidas aquí. El segundo semestre del 2017, la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile y su decano, Manuel Kukuljan, me permitieron pasar una temporada de trabajo en Barcelona, donde pude abstraerme de la vorágine académica y escribir la mayor parte del texto. Muchas de las ideas contenidas aquí surgieron, además, como parte de conversaciones en los almuerzos con los miembros del Laboratorio de Neurosistemas. Algunas personas pacientes se motivaron a leer y revisar las ideas aquí contenidas, por lo que agradezco a Hildegard Arbogast, Cecilia Babul, Juan José Barrientos, Ignacio Maldonado y Solange Tenorio. Agradezco también a Rubén Moreno-Bote por algunas estimulantes discusiones, las cuales me inspiraron a escribir sobre algunos temas. Agradezco también a Gabriel León, por sugerir el curso de acción para concretar su publicación, y ciertamente a Penguin Random House. Finalmente, un agradecimiento especial a Solange Tenorio por estar presente en cada una de las etapas de la elaboración del libro, aportando con el apoyo intelectual y

emocional necesario para completar este proyecto.

Y... ¡gracias a los lectores, por compartir mi curiosidad sobre el cerebro humano!

NOTAS

1. Véase: Santiago Ramón y Cajal, *Charlas de café. Pensamientos, anécdotas y confidencias*. México D. F.: Fondo de Cultura Económica, 2016, capítulo IX.

2. Francis H. C. Crick, «Thinking about the Brain», *Scientific American*, vol. 241, n°. 3, 1979, pp. 219-233.

3. La cita de Aristóteles se encuentra en: Charles Gross, «Aristotle and the Brain», *The Neuroscientist*, vol. 1, n°. 4, 1995, pp. 245-250.

4. Hipócrates, *Tratados hipocráticos*. Madrid: Gredos, 1983.

5. <https://www.braincouncil.eu/>

6. <https://www.nimh.nih.gov/health/publications/index.shtml>

7. Ministerio de Salud de Chile, «Informe final. Estudio de carga de enfermedad y carga atribuible», julio de 2008, 15 pp.

8. <https://www.braininitiative.org/>

9. <https://www.humanbrainproject.eu/en/>

10. <https://brainminds.jp/en/>

11. R.N. Carmody y R.W. Wrangham, «The Energetic Significance of Cooking». *Journal of Human Evolution*, vol. 57, n°. 4, 2009, pp. 379-391.

12. M.E. Phelps y J.C. Mazziotta, «Positron Emission Tomography: Human Brain Function and Biochemistry», *Science*, vol. 17, 1985, pp. 799-809.

13. M.A. Lebedev y M. Nicolelis, «Brain–Machine Interfaces: Past, Present and Future», *Trends in Neurosciences*, vol. 29, 2006, pp. 536-546. Y también: M. D. Serruya, N. Hatsopoulos, L. Paninski, «Brain-Machine Interface: Instant Neural Control of a Movement Signal», *Nature*, vol. 416, 2002, pp. 141-142.

14. T.J. Eluvathingal, H.T. Chugani, M.E. Behen, C. Juhász, O. Muzik, M. Maqbool, D.C. Chugani y M. Makki, «Abnormal Brain Connectivity in Children After Early Severe Socioemotional Deprivation: A Diffusion Tensor Imaging Study», *Pediatrics*, vol. 117, n°. 6, 2006.

15. W.M. Jenkins, y M.M. Merzenich, «Reorganization of Neocortical Representations After Brain Injury: a Neurophysiological Model of the Bases of Recovery From Stroke», *Progress in Brain Research*, vol. 41, 1987.

16. J.W. Antony, E.W. Gobel, J.K. O'Hare, P.J. Reber, K.A. Paller, «Cued Memory Reactivation During Sleep Influences Skill Learning», *Nature Neuroscience*, vol. 15, 2012, p. 1114.

17. B. Olshausen y D. Filed, «How Close Are We to Understanding V1?», *Neural Computation*, vol. 17, 2005, pp. 1665-1699.

18. D.T. Willingham, «Three Problems in the Marriage of Neuroscience and Education», *Cortex*, 2009, vol. 45, n°. 4, pp. 544-545.

19. Fundación Banmédica, «Estudio revela directa relación entre la calidad del sueño de las personas y hábitos de vida saludables» (online), 2016.

20. Gobierno de Chile, «Encuesta Nacional de Salud 2016-2017», 2018.

21. J.S. Hyde, E. Fennema, M. Ryan, L.A. Frost, C. Hopp, «Gender Comparisons of Mathematics Attitudes and Affect. A Meta Analysis», *Psychology of Women Quarterly*, 1990.

22. E.S. Spelke, «Sex Differences in Intrinsic Aptitude for Mathematics and Science?: A Critical Review», *American Psychologist*, vol. 60, n°. 9, 2005, pp. 950-958.

23. M. Johns, T. Schmader, A. Martens, «Knowing is Half the Battle: Teaching Stereotype Threat As a Means of Improving Women's Math Performance», *Psychological Science*, vol. 16, n°. 3, 2005, pp. 175-179.

24. UNESCO Institute for Statistics, «Women in Science», UIS-UNESCO, Fact Sheet n°. 51, 2018, 4 pp.

25. W. Penfieldl, *Mystery of the Mind. A Critical Study of Consciousness and the Human Brain*. New Jersey: Princeton University Press, 2016.

26. S. Ramirez, X. Liu, P.A. Lin, J. Suh, M. Pignatelli, R.L. Redondo, T.J. Ryan, S. Tonegawa, «Creating a False Memory in the Hippocampus», *Science*, Vol. 341, 2013, pp. 387-391.

27. S.J. Blakemore, D. Wolpert, C. Frith, «Why Can't You Tickle Yourself?», *Neuroreport*, vol. 11, 2000.

28. «The Cambridge Declaration on Consciousness», disponible en: <http:// fcmconference.org/img/CambridgeDeclarationOn Consciousness.pdf>.

29. SENDA, «Estudio SENDA-UC estima costo económico atribuible al consumo de alcohol en Chile en 1,5 billones de pesos al año», www.sendagob.cl (online), 14 de marzo de 2019.

30. Jason Duaine, «Man Set to Undergo World's First Head Transplant Backs Out After Finding Love and Becoming a Dad», *People* (online), 10 de abril de 2019.

31. B.L. Plassman, J.W. Williams, J.R. Burke, T. Holsinger, S. Benjamin, «Systematic Review: Factors Associated with Risk for and Possible Prevention of Cognitive Decline in Later Life», *Annals of Internal Medicine*, vol. 153, n°. 3, 2010, pp. 182-193.

32. J. Gomes-Osman, D.F. Cabral, T.P. Morris, K. McInerney, L.P. Cahalin, T. Rundek, A. Oliveira, A. Pascual-Leone, «Exercise for cognitive Brain Health in Aging: A Systematic Review for an Evaluation of Dose». *Neurology Clinical Practice*, vol. 8, n°. 3, 2018, pp. 257-265.

33. A.J. Crum y E.J. Langer, «Mind-Set Matters: Exercise and the Placebo Effect», *Psychological Science*, vol. 18, n°. 2, 2007, pp. 165-171.

34. T.J. Kaptchuk, «Powerful Placebo: the Dark Side of the Randomised Controlled Trial». *The Lancet*, vol. 6, n°. 351, 1998, pp. 1722-1725.

35. J.K. Hartshorne y L.T. Germine, «When Does Cognitive Functioning Peak? The Asynchronous Rise and Fall of Different Cognitive Abilities Across the Lifespan», *Psychological Science*, vol. 26, n°. 4, 2015, pp. 433-443.

36. Seattle Longitudinal Study, disponible en: <https://sharepoint. washington.edu/ uwsom/sls/Pages/default.aspx>.

Título original: *¿Por qué tenemos el cerebro en la cabeza*?

Edición en formato digital: julio de 2019

© 2019, Enrique Inda
© 2019, © 2019, Penguin Random House Grupo Editorial, S.A.
Merced 280, piso 6, Santiago de Chile.

Diseño de la cubierta: Random House Mondadori, S.A.

Queda rigurosamente prohibida, sin la autorización escrita de los titulares del «Copyright», bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ella mediante alquiler o préstamo públicos.

ISBN: 9789566042099

Conversión a formato digital: Newcomlab, S.L.

www.megustaleer.cl